

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

Teplotní simulace elektrického stroje

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

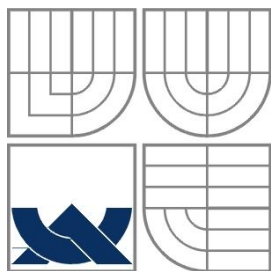
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Pavel Klaner

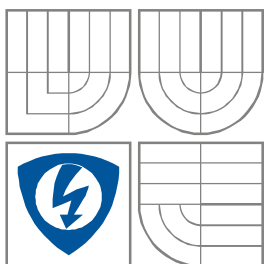
AUTHOR

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

TEPLOTNÍ SIMULACE ELEKTRICKÉHO STROJE

THE THERMAL SIMULATIONS OF ELECTRICAL MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Pavel Klaner

AUTHOR

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Pavel Klaner

Ročník: 3

ID: 78127

Akademický rok: 2008/09

NÁZEV TÉMATU:

Teplotní simulace elektrického stroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte reálný 3D model zvoleného elektrického motoru.
2. Na tomto modelu spočtete statickou a dynamickou teplotní analýzu.
3. Výsledky vyhodnoťte a porovnejte s teoretickými předpoklady.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího.

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 29.5.2009

Vedoucí projektu: Ing. Marcel Janda

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá metodou konečných prvků a jejím použitím v tepelné simulaci pomocí programu Ansys Workbench.

Abstract

Bachelor's thesis is dealing with finite element method and using it in thermal simulations by Ansys Workbench.

Klíčová slova

Metoda konečných prvků, Ansys Workbench, Asynchronní motor, Teplotní simulace

Keywords

Finite elements method, Ansys Workbench, Asynchronous motor, Thermal simulations

Bibliografická citace

Klaner, P. Teplotní simulace elektrického stroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. Vedoucí semestrální práce Ing. Marcel Janda

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Teplotní simulace elektrického stroje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marcelu Jandovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

1	TEPLOTNÍ SIMULACE ELEKTRICKÉHO STROJE	10
1.1	ÚVOD.....	10
1.2	TEORETICKÝ ROZBOR	10
1.2.1	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	10
1.2.2	HISTORIE	11
1.2.3	ANALÝZA METODY KONEČNÝCH PRVKŮ.....	11
1.2.4	ANSYS WORKBENCH.....	12
1.2.5	ANALÝZY V PROGRAMU ANSYS WORKBENCH.....	13
1.3	TEPELNÝ ROZBOR ASYNCHRONNÍHO MOTORU	18
1.3.1	ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	18
1.3.2	KONSTRUKCE.....	18
1.3.3	PRINCIP ČINNOSTI ASYNCHRONNÍHO MOTORU	19
1.3.4	TOK VÝKONŮ V ASYNCHRONNÍM MOTORU	20
1.3.5	ZTRÁTY A ÚČINNOST.....	21
1.3.6	URČENÍ ZTRÁT ASYNCHRONNÍHO STROJE	22
1.4	TEPLO	26
1.4.1	ZNAČENÍ	26
1.4.2	VÝPOČET	26
1.4.3	VLASTNOSTI	26
1.4.4	ŠÍŘENÍ TEPLA	27
1.4.5	PRVNÍ TERMODYNAMICKÝ ZÁKON.....	27
1.4.6	OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA	28
1.5	POSTUP VÝROBY MOTORU	28
1.5.1	MATERIÁLY ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	30
1.5.2	MATERIÁLY	30
	SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU	32
	VYUŽITÍ SLITIN HLINÍKU V PRAXI.....	32
1.6	IZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	33
1.6.1	TEPLOTNÍ TŘÍDY IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	34
1.7	TEPLOTNÍ SIMULACE POMOCÍ PROGRAMU ANSYS WORKBENCH	35
1.7.1	VYTVOŘENÍ MODELU	36
1.7.2	SIMULACE.....	39
1.8	VÝSLEDKY.....	46
2	ZÁVĚR.....	56
3	LITERATURA.....	58
4	PŘÍLOHY	59

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obrázek 1 - MKP</i>	10
<i>Obrázek 2 - Statická strukturální analýza</i>	13
<i>Obrázek 3 - Analýza náhodných vibrací</i>	14
<i>Obrázek 4 - Harmonická analýza</i>	14
<i>Obrázek 5 - Statická teplotní analýza</i>	16
<i>Obrázek 6 - Momentová charakteristika</i>	20
<i>Obrázek 7 - Tok výkonu v asynchronním motoru</i>	21
<i>Obrázek 8 - Náčrt</i>	36
<i>Obrázek 9 - Vysunutí</i>	37
<i>Obrázek 10 - Sestava</i>	37
<i>Obrázek 11 - Importovaný model</i>	39
<i>Obrázek 12 - Enclosure (prostředí)</i>	40
<i>Obrázek 13 - Spuštění simulace</i>	40
<i>Obrázek 14 - Tvar tetraedronu</i>	40
<i>Obrázek 15 - Mesh kostry1</i>	41
<i>Obrázek 16 - Zadání ztrát</i>	42
<i>Obrázek 17 - Motor</i>	43
<i>Obrázek 18 - Funkce Hide body</i>	44
<i>Obrázek 19 - Nastavení časových údajů simulace</i>	44
<i>Obrázek 20 - Funkce grafického řešení teploty</i>	45
<i>Obrázek 21 - Nabídka řešení</i>	45
<i>Obrázek 22 - Tvar kostry 1</i>	46
<i>Obrázek 23 - Řez kostrou 1 t=122s</i>	46
<i>Obrázek 24 - Řez kostrou 1 t=3600s</i>	47
<i>Obrázek 25 - Pohled na kostru 1 v při maximální teplotě</i>	47
<i>Obrázek 26 - Tvar kostry 2</i>	48
<i>Obrázek 27 - Řez kostrou 2 v t=41s</i>	48
<i>Obrázek 28 - Řez kostrou 2 v t=3600s</i>	49
<i>Obrázek 29 - Pohled na kostru 2 při maximální teplotě</i>	49
<i>Obrázek 30 - Tvar kostry 3</i>	50
<i>Obrázek 31 - Řez kostrou 3A1 v t= 122s</i>	50
<i>Obrázek 32 - Řez kostrou 3A1 v t=3600s</i>	51
<i>Obrázek 33 - Pohled na kostru 3A1 při maximální teplotě</i>	51
<i>Obrázek 34 - Řez kostrou 3 v t=41s</i>	52
<i>Obrázek 35 - Řez kostrou 3 v t= 3600s</i>	53
<i>Obrázek 36 - Pohled na kostru 3 při maximální teplotě</i>	53



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ASM- Asynchronní motor

FEM – Finite Element Method

MKP – Metoda konečných prvků



1 TEPLOTNÍ SIMULACE ELEKTRICKÉHO STROJE

1.1 Úvod

S nástupem nových technologií v oblasti výpočetní techniky dochází k rychlému rozvoji programových prostředků značně ulehčující práci a hlavně náklady související s vývojem a konstrukcí součástek. Simulace vznikají jako nástroj pro eliminaci zvyšování finančních nákladů, díky čteným nezdařeným pokusům během vývoje. Těmito metodami, můžeme před konstrukcí prototypu předejít mnohým chybám jejich návrhu.

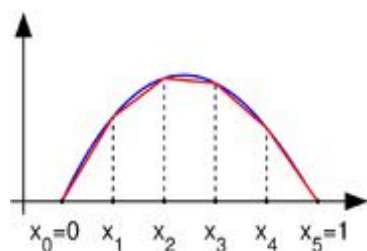
Cílem bakalářské práce je vytvoření reálného teplotního modelu asynchronního motoru. Pro řešení simulací jsem si vybral použití metody konečných prvků, tedy numerické metody založené na řešení soustavy rovnic ve spojení s programovým nástrojem Ansys Workbench.

Předlohou pro vytvoření teplotního modelu byl náčrt asynchronního motoru a rozdělení ztrát. Rozhodl jsem se pro vytvoření 3 koster vyrobených z hliníku a jedné z šedé litiny, aby bylo možné porovnat nejen tvar koster a jejich následné chlazení, ale také jaký vliv má výběr materiálu kostry.

1.2 Teoretický rozbor

1.2.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je v současné době jediná exaktní věda, která odpovídá na otázku, jestli a jak vyhoví součástka požadavkům jejího určení a to již v době, kdy vzniká její návrh na pracovišti konstruktéra.



Obrázek 1 - MKP



Výpočty pomocí programu Ansys umožňují zjistit stav součástky vystavené zatížení, kterému bude vystavena v praxi.

Metoda konečných prvků je založena na numerickém řešení rovnic popisujících odezvu modelu nahrazeného konečným počtem prvků (elementů), přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Zpravidla je možné řešit touto metodou problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit. Metoda pokrývá celou šíři fyzikálních aplikací (statika, dynamika, akustika, teplo, elektromagnetické pole, elektrostatika, piezoelektrické jevy a proudění). Výsledkem výpočtu je například ve staticce zjištění stavu deformace a napětí součásti, na jehož základě je možné zjistit míru její bezpečnosti, posoudit její životnost a únavu či stanovit pravděpodobnost její havárie. MKP řeší tyto problémy soustavou lineárních rovnic, jejichž konstrukce a řešení lze efektivně provádět za použití výpočetní techniky.

1.2.2 Historie

Vývoj metody konečných prvků můžeme vysledovat již u prací v 50 - tých letech 20. století u Alexandra Hrennikoffova (1941) a Richarda Couranta (1942). I když tyto metody byly značně odlišné, mají společný základ, a to rozšířování spojitých objektů do množiny samostatných podoblastí.

Pro řešení eliptických parciálních diferenciálních rovnic druhého stupně, které byly sestaveny z úlohy zabývající se krutem válce, dělí Hrennikoff oblast pomocí mřížky. Podobně pak Courant dělí oblast do konečného počtu trojúhelníkových podoblastí. Mohutný vývoj metody konečných prvků začal při řešení konstrukce letadla a úloh statické mechaniky. Metoda byla propracována spolu s precizním matematickým aparátem v roce 1973 v publikaci Stranga a Fixe.

1.2.3 Analýza metody konečných prvků

Analýza metody konečných prvků byla zobecněna do samostatného oboru Aplikované matematiky pro numerické řešení fyzikálních soustav.



Z matematického hlediska je metoda konečných prvků používána pro nalezení aproximovaného řešení parciálních diferenciálních rovnic i integrálních rovnic (např. rovnice vedení tepla). Postup řešení je založen jednak na úplné eliminaci diferenciální rovnice (stacionární úlohy), nebo na převedení parciálních diferenciálních rovnic na ekvivalentní obyčejnou diferenciální rovnici, jež je následně řešena standardními postupy jako např. metodou konečných diferencí. Při řešení parciálních diferenciálních rovnic je základním krokem sestavení rovnice, která aproximuje řešenou rovnici, a která je numericky stabilní ve smyslu, že chyby ve vstupních datech a pomocných výpočtech se neakumulují a nevedou tak k nesmyslným výsledkům. Existuje celá řada možných postupů, všechny s určitými výhodami i nevýhodami. Metoda konečných prvků je rozumnou volbou pro řešení parciálních diferenciálních rovnic na složitých oblastech nebo v případě, kdy se požadovaná přesnost mění po celé oblasti řešení.

1.2.4 Ansys Workbench

Ansys je univerzální softwarový nástroj pro modelování a analýzu pracující na bázi metody konečných prvků. Používá se pro řešení úloh z oblastí mechaniky, statiky, tepelných dějů, proudění kapalin a plynů, elektromagnetismu a elektrických polí. Tyto analýzy je možné kombinovat, tudíž nastává možnost řešení několika úloh najednou (např. tepelné a mechanické namáhání).

Ansys Workbench byl poprvé představen ve verzi 7.0 jako prostředí programu Ansys DesignSpace. Menu orientované ve stylu CAD systémů podporujícím účinné algoritmy výpočtů na geometrii CAD modelu představuje nový, od klasického postupu výpočtu odlišný a přitom vysoce efektivní, způsob práce. Vývoj Ansys Workbench je nasměrován na integraci programů Ansys Base Series, které jsou určeny pro výpočtáře.

Ansys Workbench v aktuální verzi Ansys 11 je vývojové prostředí, které umožňuje rychlou a efektivní práci současným sdílením libovolných CAD systémů a skupiny MKP softwaru, který je integrovatelný do prostředí Ansys Workbench. Ansys Workbench integruje různé fyzikální analýzy do jednoho multifyzikálního výpočtu, přičemž je výpočet prováděn přímo na geometrii modelu. Toto přispívá k radikálnímu snížení času potřebnému k řešení úloh.



Je určen pro konstruktéry, vývojáře a další uživatele metody konečných prvků, přičemž umožňuje provádět požadované analýzy vysoce efektivně. Intuitivní jednoduché prostředí plus ovládací menu umožňují zkrátit přípravu modelu řádově z hodin na minuty. Lze jej spustit přímo z menu CAD systému, čímž je automaticky importována geometrie. Nepoužívá se žádná transformace, síť pro výpočet je generována přímo na původní geometrii. V místech vzájemného styku součástí je automaticky vygenerován kontakt. Parametricky definované veličiny geometrie jsou automaticky použitelné jako parametry pro výpočet v programu Ansys, takže pokud dojde výpočtem ke změně geometrie, mění se přímo geometrie CAD modelu. Při úpravách geometrie na CAD modelu zůstávají zachovány okrajové podmínky a zatížení.

Příklad CAD systémů kompatibilních s Ansys Workbench

- Catia
- Pro/Engineer
- SolidWorks
- Solid Edge
- Unigraphics
- Inventor

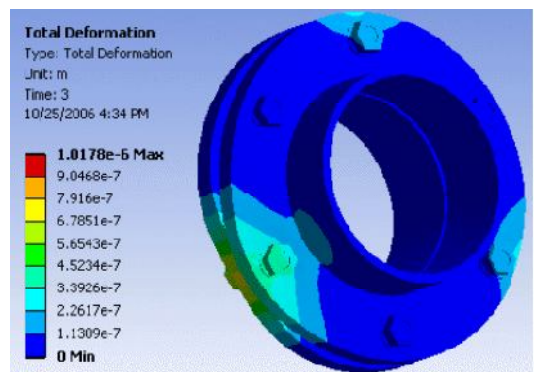
1.2.5 Analýzy v programu Ansys Workbench

Strukturální analýza

- používá se pro stanovení reakce sil, mechanické namáhání a deformace.

Druhy strukturální analýzy:

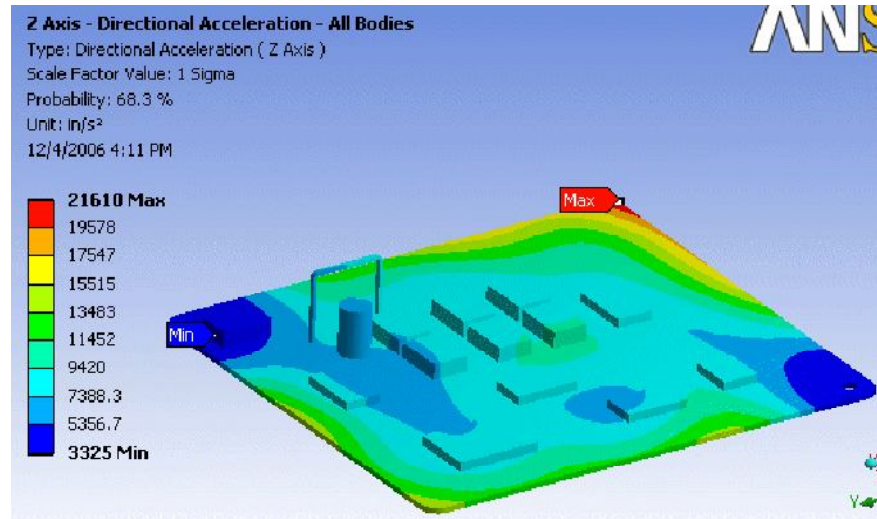
Statická analýza – Používá se při podmínkách statického zatížení. Je možné řešit jak lineární, tak i nelineární úlohy, jako např.: rozsáhlé průhyby, ohyb, napětí v nosníku, pevné spoje a plastičnost.



Obrázek 2 - Statická strukturální analýza

Modální analýza – Výpočet vlastních frekvencí a tvar módů lineárního systému.

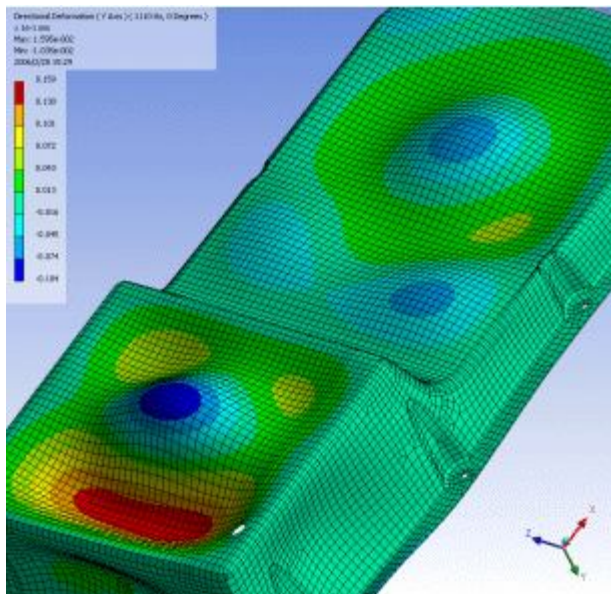
Spektrální analýza pro výpočet namáhání v důsledku náhodných vibrací



Obrázek 3 - Analýza náhodných vibrací

Harmonická analýza

Výpočet odezvy lineárního systému na harmonicky proměnnou zátěž.



Obrázek 4 - Harmonická analýza

***Přechodová dynamická analýza***

Výpočet odezvy systému na časově proměnnou zátěž. Výpočet vzpěrového namáhání – mechanika zlomů, výpočet únavy materiálů.

Teplotní analýza

Používá se pro určení ustálené, nebo časově proměnné rozložení teploty v simulovaném objektu. Mezi další hledané veličiny patří tepelné ztráty nebo oteplení, teplotní gradienty, tepelný tok. Tato analýza je velmi často kombinovaná s analýzou strukturální pro určení namáhání v důsledku šíření tepla.

Teplotní analýzou můžeme řešit:

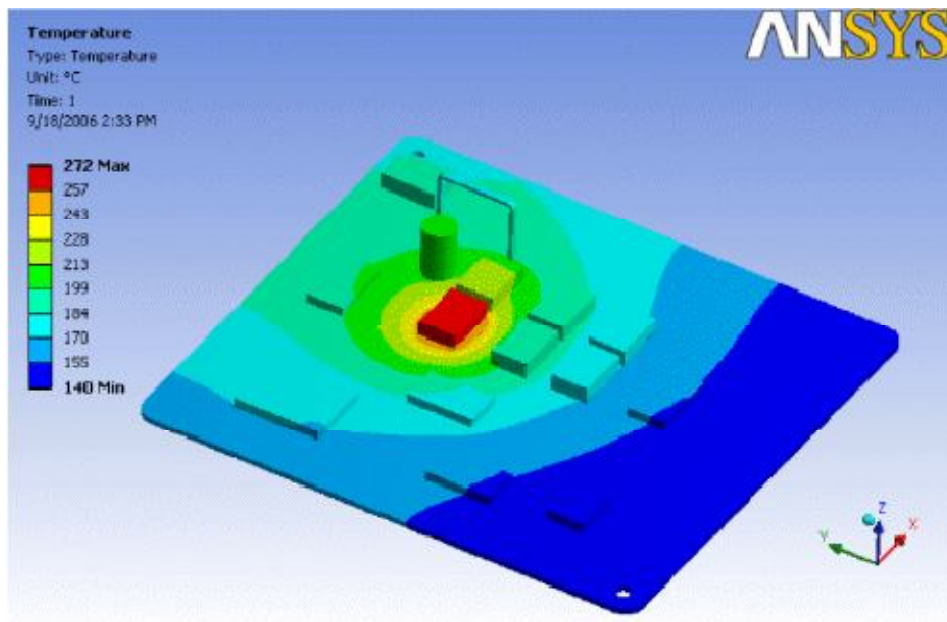
Fázové změny (tavení nebo tuhnutí), vnitřní zdroje tepla (Joulovo teplo v důsledku průchodu elektrického proudu). Základní principy přenosu tepelné energie (vedení – kondukce, proudění – konvekce, záření – radiace).

Statická teplotní analýza

Statická tepelná analýza počítá účinky rovnoměrné tepelné zátěže na celý systém nebo na jeho součást. Může být použita pro určení teploty, teplotního gradientu a teplotního toku způsobeného tepelnou zátěží, kterou nelze měnit v čase.

Statická teplotní analýza je také často prováděna před teplotní přechodovou analýzou, aby pomohla určit počáteční podmínky, nebo může být také posledním krokem teplotní přechodové analýzy poté, co všechny přechodové jevy skončily.

Statická teplotní analýza může být lineární s konstantními vlastnostmi materiálů nebo také nelineární v případě teplotně závislých vlastností materiálů. Tepelné vlastnosti většiny materiálů se mění spolu s teplotou, takže analýzy jsou obvykle nelineární.



Obrázek 5 - Statická teplotní analýza

Přechodová teplotní analýza

Přechodová teplotní analýza se používá pro určení teploty a tepelného množství měnícího se v čase. Změny rozložení teploty v čase jsou důležité pro mnoho aplikací jako například chlazení elektronických bloků. V oblasti zájmu je také teplotní namáhání způsobené rozložením teploty, které může způsobit selhání. V takových případech jsou výsledky teplotní analýzy využívány jako vstupní data pro strukturální analýzu tepelného namáhání.

Teplotní přechodová analýza zahrnuje mnoho problémů jako např. design elektronických bloků, trysky, bloky motorů, tlakové nádoby, interakce mezi kapalinou a pevnou látkou atd. Tepelná přechodová analýza může být lineární i nelineární. Teplotně závislé materiálové vlastnosti (tepelná vodivost, tepelná kapacita, hustota) nebo teplotní závislost koeficientů vedení tepla a tepelného záření může mít za následek nelineární analýzu, která vyžaduje k dosažení přesného řešení iterační postup. Tepelné vlastnosti většiny materiálů se mění s teplotou, proto jde obvykle o nelineární analýzy.



Elektromagnetická analýza

Magnetická analýza se používá pro výpočet magnetických polí. Mezi hledané veličiny v magnetické analýze patří hustota magnetického toku, intenzita magnetického pole, magnetické síly a momenty, impedance, indukčnost, vířivé proudy, výkonové ztráty a rozptyl magnetického toku. Magnetické pole může být generováno elektrickými proudy, permanentními magnety nebo externími poli.

Typy magnetické analýzy:

- Statická magnetická analýza – výpočet magnetických polí generovaných stejnosměrným proudem nebo permanentními magnety.
- Harmonická magnetická analýza – výpočet magnetických polí v důsledku střídavého proudu.
- Přechodová magnetická analýza – výpočet magnetických polí generovaných časově proměnným elektrickým proudem nebo externím polem.
- Elektrická analýza - používá se pro výpočet elektrického pole ve vodivých nebo kapacitních systémech.

Mezi hledané veličiny patří:

- Proudová hustota
- Hustota náboje
- Intenzita elektrického pole
- Joulovo teplo.

Vysokofrekvenční elektromagnetická analýza se používá pro řešení prvků mikrovlnné a radiové techniky, vlnodů, radarových systémů, koaxiálních konektor, apod.



Fluidní analýza

Používá se pro stanovení toku a teplotních charakteristik proudících tekutin. Do fluidní analýzy zahrnujeme např. akustickou analýzu – interakce mezi proudící tekutinou a okolními tělesy, šíření zvukových vln, dynamika systémů pod hladinou tekutiny.

Analýza spřažených polí

Uvažuje se vzájemná interakce mezi dvěma nebo více poli. Jednotlivá pole se navzájem ovlivňují, nelze je tedy řešit samostatně a odděleně od ostatních polí. Ansys umožňuje kombinaci více polí.

1.3 Tepelný rozbor asynchronního motoru

1.3.1 Asynchronní motor

Asynchronní motor patří do skupiny elektrických strojů, umožňující elektromechanickou přeměnu energie. Jedná se o elektromotor, pracující na střídavý proud. Vynalezl jej srbský fyzik Nikola Tesla. Tento motor je nejrozšířenější pohon v elektrotechnice. Tok energie mezi hlavními částmi motoru (stator a rotor) je realizován pomocí elektromagnetické indukce, proto se často tento motor označuje jako motor indukční.

Výhodou asynchronního motoru je vysoká spolehlivost, jednoduchá konstrukce a napájení z běžné střídavé sítě. Napájecí napětí může být jednofázové nebo trojfázové. Trojfázové motory jsou používanější než jednofázové. Používají se téměř výhradně jako motory s výstupním mechanickým pohybem otáčivým nebo lineárním.

1.3.2 Konstrukce

- **Stator** – Je u většiny elektrických strojů stejný. Je složen z nosné kostry motoru, svazku statorových plechů a statorového vinutí.
- **Rotor** – Hřídel s nalisovanými rotorovými plechy s drážkami, do kterých se vkládají měděné tyče, které jsou na obou stranách spojeny mosaznými kruhy. Takto upravený rotor se nazývá „kotva na krátko“ nebo „kotva klecová“. Jedná se o základní druhy



klecí, dále máme ještě kotvy se speciální úpravou klece (s odporovou klecí, dvojitou klecí). Tyto úpravy slouží ke zvýšení záběrného momentu.

- **Kotva na krátko** - V drážkách rotoru jsou nalisovány neizolované měděné, mosazné nebo hliníkové tyče, které jsou na obou koncích spojeny zkratovacími kroužky. Tyče spolu s kroužky mají podobu klece.
- **Kroužková kotva** - Na hřídeli jsou kromě svazku rotorových plechů i sběrné kroužky. V drážkách plechů je uloženo trojfázové vinutí rotoru z izolovaných vodičů, které je zapojeno většinou do hvězdy, zřídka do trojúhelníka. Na tři sběrací kroužky je připojeno vinutí rotoru, ke kterým lze připojit činné odpory sloužící k rozběhu motoru.

1.3.3 Princip činnosti asynchronního motoru

Základem činnosti asynchronního motoru je vytvoření točivého magnetického pole, které vznikne průchodem střídavého trojfázového proudu vinutím statoru. Toto magnetické pole indukuje v rotoru napětí a vzniklý proud vyvolává sílu otáčející rotorem.

Otáčky točivého pole (synchronní otáčky) jsou dány frekvencí napájecího napětí a počtem pólů trojfázového motoru.

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (1)$$

kde f je frekvence napájecího napětí

p počet pólových dvojic statoru

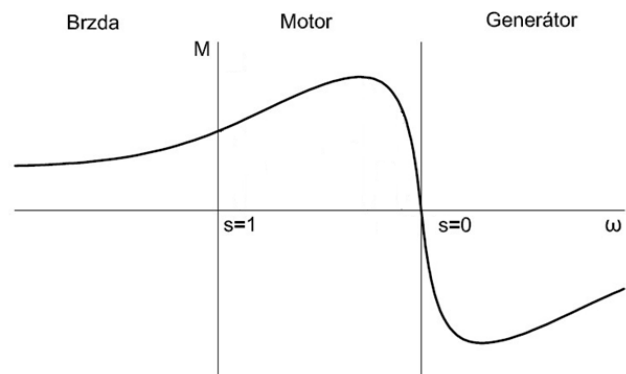
Rotor se nikdy nemůže otáčet stejnými otáčkami jako magnetické pole statoru. Pokud by se to tak stalo, pak by se rotor a magnetické pole vůči sobě nepohybovaly, a tím by se neindukovalo napětí a ani by nevznikala točivá síla. Míra rozdílu otáček pole a rotoru je nazývána skluz, většinou udávaný v procentech.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (2)$$



Podle velikosti hodnoty skluzu dělíme práci asynchronního stroje na tři oblasti:

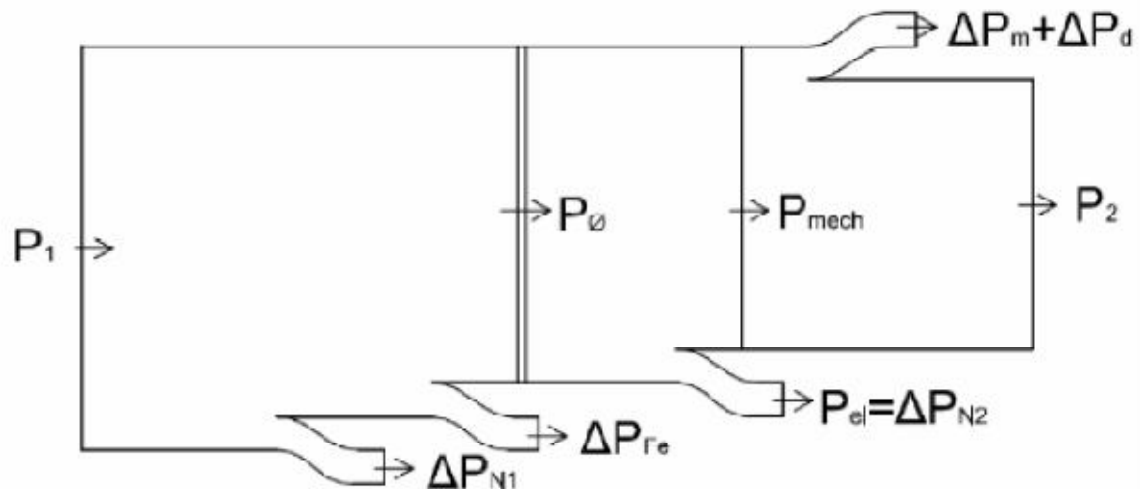
- Generátorový chod $s \in (-\infty, 0)$
- Motorový chod $s \in (0, 1)$
- Brzdový chod $s \in (1, \infty)$



Obrázek 6 - Momentová charakteristika

1.3.4 Tok výkonů v asynchronním motoru

Z příkonu odebíraného motorem ze sítě se hradí činné ztráty ve vinutí statoru ΔP_{N1} a ztráty v magnetickém obvodu motoru ΔP_{FE} . Hlavní část příkonu P však prochází vzduchovou mezerou do rotoru. Odečteme-li od P činné ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{N2} , dostaneme mechanický výkon stroje P_{mech} . Na stator i na rotor působí stejně velký moment M . Výkon na hřídeli není celý mechanický výkon P_{mech} , ale výkon P_2 menší o vlastní mechanické ztráty stroje ΔP_m a ztráty dodatečné ΔP_d .



Obrázek 7 - Tok výkonu v asynchronním motoru

1.3.5 Ztráty a účinnost

V každém elektrickém stroji se část přiváděné energie mění v energii tepelnou, která se ve stroji nevyužije a představuje ztráty. Ztrátami je dána účinnost a ekonomické využití stroje.

Ztráty lze rozdělit na:

- Ztráty mechanické ΔP_{mech} , způsobené třením kartáčů o kroužky či komutátor, třením v ložiscích, třením rotujících částí o vzduch (ztráty ventilační).
- Ztráty v magnetickém obvodu stroje ΔP_{Fe} (ztráty v železe), které sestávají ze ztrát hysterezních a ztrát od vířivých proudů. Pro určení těchto ztrát se používají tyto vztahy:

$$\Delta P_h = k_n \cdot f \cdot B_m^k \cdot m \quad (3)$$

$$\Delta P_v = k_v \cdot f \cdot B_m^2 \cdot m \quad (4)$$



kde ΔP_h a ΔP_v jsou ztráty hysterezní a vířivými proudy, k_h a k_v koeficienty závislé na materiálu a tloušťce plechů, B_m je maximální hodnota magnetické indukce B , m je hmotnost magnetického materiálu, f je frekvence.

- c) Ztráty ve vinutí, které závisí na ohmickém odporu vinutí R a druhé mocniny protékajícího proudu.

$$\Delta P_n = R \cdot I^2 \quad (5)$$

- d) Ztráty dodatečné ΔP_d , mezi které počítáme ztráty vyššími harmonickými, vířivými proudy v hmotách blízko vinutí a ztráty na komutátoru. Celkové ztráty jsou pak dány součtem všech ztrát stroje:

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_{FE} + \Delta P_N + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \quad (6)$$

Účinnost elektrického stroje je definována vztahem

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_\Sigma} \quad (7)$$

nebo vztahem

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P_\Sigma}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_\Sigma}{P_1} \quad (8)$$

kde P_1 je příkon, P_2 je výkon.

1.3.6 Určení ztrát asynchronního stroje

a) Měření naprázdno

Stroj musí mít hřídel mechanicky odpojenou od poháněného zařízení, popř. zatěžovacího stroje. Pokud se jedná o stroj s vinutým rotorem, lze jeho rozběh realizovat pomocí spouštěcích odporů, ale po rozběhu musí být vyřazeny a rotorové vinutí musí být spojeno nakrátko.

Při měření se určuje proud naprázdno, ztráty v magnetickém obvodu (v železe) a ztráty mechanické případně velikost skluzu. Měření se provádí obvykle v rozsahu napájecího napětí



(130-30 %) U_n . Měření se musí provádět při konstantní otáčivé rychlosti stroje. Při malých napájecích napětích se však vytvořený moment může blížit hodnotě, která je potřebná pro krytí mechanických ztrát stroje. Pak může nastat pokles otáčivé rychlosti a stroj se může dostat do labilní části své momentové charakteristiky, nebo zastavit. Z těchto důvodů se měří otáčky stroje a při skluzu okolo 1% se doporučuje měření ukončit. Mezi viditelný napájecí zdroj a svorky U, V, W asynchronního stroje zapojíme měřící přístroje.

Pro měření naprázdno je důležitá symetrie napájecího zdroje. Proto se doporučuje obsadit každou fázi shodnými měřícími přístroji. Z měření se vynese charakteristika naprázdno. Budícím proudem je v tomto případě proud odebíraný ze zdroje I_0 , který také obsahuje činnou složku nutnou na krytí ztrát. Místo indukovaného napětí se vynáší často napětí svorkové. Charakteristika naprázdno je pak závislost $U=f(I_0)$. Dále se graficky znázorní průběhu účinnosti. Ztráty, změřené v chodu naprázdno, jsou součtem ztrát Joulových způsobených proudem naprázdno, v železe magnetického obvodu statoru a ztrát mechanických.

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j0} + \Delta P_m \quad (9)$$

Ztráty v magnetickém obvodu rotoru můžeme zanedbat. Jsou velice malé vzhledem k nepatrnému skluzu, při kterém měření probíhá. V rotoru dále můžeme zanedbat i Joulovy ztráty, protože v chodu stroje naprázdno jsou rotorové proudy malé. U stroje s vinutým rotorem můžeme i rotorové proudy měřit a Joulovy ztráty spočítat. Můžeme (analogicky jako u transformátoru) využít známého převodu stroje. Je však nutno vzít v úvahu velmi malý kmitočet rotorových proudů. To vyžaduje speciální měřící zařízení.

Po výpočtu Joulových ztrát ΔP_{j0} tyto odečteme od ztrát změřených ΔP_0 a obdržíme společné ztráty mechanické a ztráty v železe magnetického obvodu.

$$\Delta P_0 - \Delta P_{j0} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \quad (10)$$



Pro určení ztrát mechanických ΔP_m a ztrát v železe statoru ΔP_{Fe} provedeme grafické znázornění jednotlivých ztrát, ale pro znázornění součtu $\Delta P_{Fe} + \Delta P_m$ použijeme kvadratickou stupnici napětí.

Použitím kvadratické stupnice se závislost $\Delta P_{Fe} + \Delta P_m = f(U^2)$ zobrazí jako přímka. Její extrapolaci do nulového napětí stanovíme průsečík s osou ztrát a tato hodnota odpovídá ztrátám mechanickým. Tato složka ztrát je závislá na otáčivé rychlosti stroje, ale ta byla po celé měření konstantní.

Tento postup můžeme nahradit určením koeficientů polynomu druhého stupně, na základě známých souřadnic bodů funkce $\Delta P_{Fe} + \Delta P_m = f(U)$.

b) Měření nakrátko

Schéma zapojení je v podstatě shodné jako při měření naprázdno, ale musíme navíc rotor mechanicky zabrzdít – zablokovat. Toto blokovací zařízení musí být natolik pevné, aby se ani stroj (omylem) připojený na jmenovité napájecí napětí nemohl začít otáčet. Druhou možností je mechanické zabrzdění „ustříhnutelné“, takže pokud by moment stroje překročil danou hodnotu, rotor se uvolní a rozběhne se.

Při měření nakrátko se určí charakteristika nakrátko, průběh ztrát nakrátko a účinník nakrátko. Mezi trojfázový říditelný zdroj a zabrzděný stroj se zapojí měřící přístroje. Charakteristika nakrátko je závislost $I_k = f(U_k)$. Teoreticky by měla být přímková, protože hlavní tok ve stroji neexistuje a železo není syceno. Prakticky se ale její průběh od přímkového liší. Je to způsobeno sycením zubů statoru a hlav rotorových zubů rozptylovými toky ve stroji. Jejich úplné nasycení se projeví jako zvětšení vzduchové mezery, a proto se derivace charakteristiky nakrátko neustále zvyšuje. Po nasycení zubové vrstvy již charakteristika dále stoupá opět přímková. Proto pro výpočet proudu nakrátko je nutné použít vztahu (lineární extrapolace).

$$I_{kn} = \frac{U_n - U_{k0}}{U_k - U_{k0}} \cdot I_k \quad (11)$$



O proudu I_k se předpokládá, že roste po tečně k naměřené charakteristice. Uvádí se, že odchylka skutečného proudu nakrátko od takto stanovené hodnoty je asi 10-20%. Pro vlastní měření z této úvahy vyplývá, že se musí měřit do vysokých hodnot proudů až do 150% nebo dokonce 200% I_n . Měřit se musí velice rychle, aby nedošlo ke zkreslení výsledků vlivem ohřevu vinutí stroje, nebo dokonce ke zničení vinutí stroje. Proto se doporučuje připojit měřící přístroje přes ke stroji přes stykač. Stroj pak připojíme na říditelný zdroj na několik sekund a ihned po ustálení přístroje provedeme odečet a stroj odpojíme.

Ztráty nakrátko jsou tvořeny Joulovými ztrátami a ztrátami přídavnými.

$$\Delta P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d \quad (12)$$

Ztráty v železe se zanedbávají (vyjma zubové vrstvy, sycené rozptylovými toky). Joulovy ztráty určíme ze známých odporů vinutí a převodu k .

$$\Delta P_{jk} = \frac{3}{2}(R_1 + kR_2)I_1^2 \quad (13)$$

Výraz opět určuje ztráty ve vinutí bez ohledu na jeho spojení. Odečtením ztrát Joulových ΔP_{jk} od ztrát celkových je možné obdržet ztráty přídavné.

$$\Delta P_d = P_k - P_{jk} - \Delta P_{FeUk} \quad (14)$$

Ztráty ΔP_{FeUk} jsou ztráty v železe odpovídající napájecímu napětí U_k v chodu nakrátko.



1.4 Teplo

Teplo, jinak též tepelná energie, je část vnitřní energie, kterou těleso přijme nebo odevzdá při tepelné výměně druhému tělesu. Je třeba rozlišovat dvě různé veličiny teplota, která vyjadřuje stav tělesa a teplo, které vyjadřuje změnu stavu tělesa.

Podle kinetické teorie je teplo celkovou kinetickou energií neuspořádaného pohybu částic, z nichž se látka skládá. Přeměna mechanické práce na teplo je kinetickou teorií vysvětlována jako přeměna energie uspořádaného pohybu na kinetickou energii neuspořádaného pohybu částic.

1.4.1 Značení

- Značka: Q
- Základní jednotka: joule, zkratka J

1.4.2 Výpočet

Množství tepla obsažené v látce lze určit ze vztahu

$$Q = mc\Delta T, \quad (15)$$

kde m je hmotnost, c je měrná tepelná kapacita, ΔT je rozdíl počáteční teploty T_1 a koncové teploty T_2 (tzn. $\Delta T = T_2 - T_1$). (16)

1.4.3 Vlastnosti

Teplo potřebné k ohřátí látky o jeden teplotní stupeň se nazývá tepelná kapacita. Teplo potřebné k ohřátí jednoho kilogramu látky o jeden teplotní stupeň se nazývá měrná tepelná kapacita (měrné teplo). Teplo potřebné k ohřátí jednoho molu látky o jeden teplotní stupeň se nazývá molární tepelná kapacita (molární teplo).

Měřením tepla se zabývá kalorimetrie. Základem kalorimetrických úvah je zákon zachování energie, jehož znění vyjadřuje tzv. kalorimetrická rovnice.



1.4.4 Šíření tepla

Šíření tepla mezi dvěma tělesy o různých teplotách rozdělujeme na tři druhy:

- Vedením - Při vedení (neboli kondukcii) se tepelná energie postupně šíří v nepohyblivé hmotě.
- Prouděním - Při proudění (neboli konvekci) dochází k přenosu tepla v důsledku proudění a promíchávání různě ohřátých částí hmoty.
- Tepelným zářením - Při tepelném záření (neboli sálání či radiaci) dochází k vyzařování energie ze zdroje ve formě elektromagnetických vln a jeho následnému pohlcování ozařovaným tělesem.

Teplo se vždy šíří od místa s vyšší teplotou k místu s nižší teplotou. Tepelná energie se může šířit vedením a prouděním pouze v prostředí, které je vyplněno látkou. Příčinou šíření je neustálý pohyb částic hmoty. Vzájemným působením mezi jednotlivými částicemi (např. srážkami) dochází k předávání kinetické energie a to tak dlouho, dokud nedojde k vyrovnání teplot.

Tepelné záření se svojí povahou odlišuje od vedení a proudění, neboť tepelná energie se může přenášet i v prostoru, který není vyplněn látkou (tedy i ve vakuu). Důvodem je skutečnost, že sálání představuje elektromagnetické záření, které ke svému přenosu hmotu nepotřebuje.

Množství vyzařovaného a přijímaného tepla závisí na rozdílu teplot tělesa a okolí a na barvě povrchu tělesa (tmavá a matná tělesa vyzařují a přijímají více tepla, světlá a lesklá tělesa vyzařují a přijímají méně tepla).

1.4.5 První termodynamický zákon

Představuje ve fyzice formulaci zákona zachování energie. Podle tohoto zákona je celková energie izolované soustavy časově neměnná. Energie tedy v izolované soustavě nemůže samovolně vznikat ani zanikat. Druh energie se však může měnit, např. mechanická energie může přecházet na teplo apod.

První hlavní termodynamickou větu je tedy možno vyjádřit následujícím tvrzením.

„Celkové množství energie (všech druhů) izolované soustavy zůstává zachováno.“



1.4.6 Oteplovací zkouška

Oteplovací zkouška má prokázat, že oteplení nebo teplota, vznikající činností elektrického předmětu, nepřekročí u stanovených částí za stanovených podmínek stanovené hodnoty.

Zkouška se provádí tak, že při stanoveném zatížení (zpravidla jmenovitém), nebo přetížení se měřením teploty zjišťuje, zda ustálená teplota daných částí nepřesahuje stanovenou maximální teplotu danou např. třídou předmětu nebo příslušnou technickou specifikací. Předmět se zkouší v takové poloze a zakrytování, jako při obvyklém užívání.

Norma podává přehled vhodných metod a přístrojů pro měření teploty včetně odkazů na přidružené normy. K měření lze používat všech typů teploměrů klasických i elektronických, indikátorů teploty nebo stanovit oteplení pomocí výpočtu ze změny odporu vinutí. U kapalinových teploměrů je omezeno použití rtuťových teploměrů v silných střídavých magnetických polích, kde se rtuť zahřívá vlivem indukovaných vířivých proudů. Společný požadavek na všechny metody je, aby čidla měla dostatečný tepelný styk s měřeným místem a aby nebyla z vnějšku ochlazována a neodváděla příliš mnoho tepla z měřeného místa.

1.5 Postup výroby motoru

Výroba motoru začíná v lisovně, kde se dynamoplech zpracovává na polotovar pro výrobu rotorů a statorů. Ten je dodáván ve svitcích, které jsou děleny na pásy, ze kterých se lisují statorové a rotorové plechy. Výlisky se rovnají podle hmotnosti a podle výrobní řady elektromotoru do paketů.

Sestava statorových plechů se spojují pomocí plechového pásku, u větších paketů se kromě spojení pásky používá i speciální lepidlo, které je nanášeno mezi jednotlivé plechy zcela automaticky.

Rotorové plechy se ještě v lisovně vsazují do tlakového licího stoje a pod tlakem 400 tun je do připravené formy vtlačeny roztavený elektrovedný hliník. V dalších operacích se odstraňují nálitky a obrábí se vnitřní průměr klece rotoru. Tím je klec připravena pro lisování na hřídel. Ta se soustruží z 6m tyčí a s klecí rotoru je po vytvoření drážky pro pero slisována.



Ihned po slisování následuje kontrolní měření souososti. Protože se ve všech předchozích operacích hřídele opracovávají s přídavkem, následuje nyní broušení a povrchová úprava, po níž je rotor dynamicky vyvažován pomocí kroužků umístěných na nálitcích čel rotoru. Rotor v této podobě putuje na montážní pracoviště.

Na jiném místě výrobního pracovišti je mezitím do drážek statorových paketů tlakem vstřelován izolační materiál, do kterého se v navijárně ukládá vinutí. Samotný proces vkládání vinutí probíhá několikrát za sebou, dokud nejsou obsazeny všechny drážky. Strojní ukládání vinutí se používá jen na standardní typy motorů, na speciální typy je dosud používáno ručního zakládání, protože u této operace nelze strojově dosáhnout vysoké koncentrace smyček. Jednotlivá vinutí se zapojí podle fází, osadí vývody a zaizolují. Po odzkoušení vinutí se statorový svazek naimpregnuje a zafixuje, aby nedocházelo k jejich uvolňování za provozu. Tím je i stator připraven na finální montáž.

Ještě před montáží je potřeba vyrobit kostru motoru, ložisková čela a různé krytky, patky a svorkovnice. Ve finální podobě je na montážní pracoviště dodává vlastní slévárna hliníku a šedé litiny disponující vlastní obrobnu. Do přípravy taveniny hliníku vstupují samozřejmě veškeré odpady z obrábění hliníkových částí a také odpad po lisování dynamoplechu je využíván jako vstupní materiál pro přípravu šedé litiny. Pro opracování ložiskových štítů se využívají CNC obráběcí stroje a ve slévárně rovněž vznikají výlisky plechových krytů ventilátoru.

V předmontáží se provádí zalisování statorového svazku do kostry, opracování osazení koster a frézování patek elektromotoru. Opracování osazení se provádí cirkulárním frézováním a celé zařízení je koncipováno jako linka se třemi operacemi - válečkování vnitřního průměru statoru, opracování osazení a patek koster na jedno upnutí a měření s automatickým vyhodnocováním výsledků.

Při finální montáží se již sestavují kompletní rotory se statory v kostře. Po kompletaci a propojení svorkovnice se vnitřní plochy statoru vyčistí stlačeným vzduchem. V dalších operacích jsou na rotor lisována ložiska a probíhá sesazení rotoru se statorem, ventilátorem a ložiskovými čely.



1.5.1 Materiály asynchronního motoru

Pro vinutí elektrických strojů a přístrojů používáme vodiče o velké elektrické vodivosti. Nejpoužívanějším materiálem je elektrolytická měď, mající čistotu 99,9%, měrnou hustotou $8,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, teplotu tavení 1083°C , měrnou vodivost při 20°C s hodnotou $58 \cdot 10^6 \text{ S/m}^2$ a měrný odpor ($0,07241 \cdot 10^{-6}$) $\text{Ohm}\cdot\text{m}$. Měď se vyrábí tvrdá, polotvrdá a měkká. Tvrdá se používá tam, kde je nutná značná mechanická pevnost (komutátory). Měkká se používá pro vinutí elektrických stojků. Po mědi se nejvíce používá hliník o čistotě 99,5%. Odpor hliníkového vodiče je oproti měděnému stejných rozměrů asi 1,7 krát větší, mechanické vlastnosti jsou horší. Hliník se na povrchu rychle okysličuje, jeho kysličník má mnohem větší odpor a je příčinou obtížného spojování hliníkových vodičů. Výhodou je jeho malá měrná hmotnost (3,5 krát menší než mědi). V elektrických stojkách se používá pro vinutí rotorů asynchronních motorů s kotvou nakrátko metodou tlakového lití. Vodiče se používají kruhového (pro menší proudy) nebo obdélníkového průřezu.

Izolace vodičů

Izolace vodiče elektrického stroje má vodič izolovat proti magnetickému obvodu, němž je uložen proti sousedním vodičům a jiným neaktivním částem. Životnost elektrického zařízení závisí hlavně na jakosti a trvanlivosti použité izolace. Při návrhu běžného zařízení se předpokládá, že za obvyklých podmínek vydrží izolace 20 let. Trvanlivost materiálů používaných na izolaci závisí na mnoha činitelích jako je teplota, elektrické a mechanické namáhání (chvění, otřesy, vliv rozdílné tepelné roztažnosti), škodlivé účinky okolí (vlhkost, nečistoty, chemikálie), apod. Nejdůležitější z těchto činitelů je teplota. Pro malé a některé střední stroje se používá na vinutí smaltovaných vodičů profilovaných nebo kulatých. Vodiče bývají dvakrát opředeny bavlnou. Pro vyšší teploty se k opředení používá skelného vlákna.

1.5.2 Materiály

a) Šedá litina

Šedá litina (také LLG - „litina s lupénkovým grafitem“) je slitinou železa s uhlíkem, přičemž obsah uhlíku (C) je vyšší než 2,14 %. Pod touto hranicí hovoříme o ocelích. Uhlík je vyloučen v elementární formě jako lamelární grafit v železné kovové hmotě.



Chemické složení a vlastnosti šedé litiny

Šedá litina je vícesložková slitina železa s uhlíkem, křemíkem, manganem, fosforem, sírou a s dalšími prvky. Obsah uhlíku je obvykle 2,8 až 4 %. Krystalizuje přibližně podle stabilní soustavy rovnovážného diagramu Fe – C. Skutečný průběh krystalizace je však odlišný v závislosti na přítomných doprovodných nebo legujících prvcích a rychlosti ochlazování.

Šedá litina se vyznačuje relativně vysokou pevností v tlaku. Ostatní mechanické vlastnosti jsou nepříznivě ovlivněny lamelárním tvarem grafitu. Grafitové lamely působí jako vruby v kovové hmotě a snižují pevnost v tahu na pouhých 10 až 35 MPa. Lamelová forma grafitu zvyšuje tepelnou vodivost SL. Vlastnosti SL jsou normovány v ČSN a evropských normách.

Výroba šedé litiny

Šedá litina se vyrábí přetavením surového vysokopecního železa a ocelového šrotu v kuplovnách nebo v elektrických pecích. Tavenina se potom odlévá převážně do pískových forem. Předností šedé litiny je její dobrá zatékavost i do složitých forem, relativně nízká teplota tavení, teplota lití v rozmezí 1100-1300°C a dobrá odolnost vůči korozi. Výroba podléhá normám: ČSN 42 2415 - DIN 1691 GG 15, ČSN 42 2420 - DIN 1691 GG 20, ČSN 42 2425 - DIN 1691 GG 25.

b) Hliník

Hliník je kov bílé barvy, vysoké elektrické a tepelné vodivosti s poměrně vysokou hodnotou měrného tepla tání. Hliník a jeho slitiny se vyznačují vysokým poměrem meze pevnosti v tahu a hustoty. Pevnostní charakteristiky je možné intenzivním tvářením zvýšit. Hliník má kubickou plošně centrovanou mřížku, teplotu tavení 660°C, hustotu 2699 kg.m⁻³ při čistotě 99,99 %. Významnou vlastností hliníku je jeho poměrná stálost na vzduchu. Ke zjemnění zrna se přidávají malá množství prvků, například Ti, Zr, Ta.



Slitiny hliníku

Nejznámější je slitina s hořčíkem, mědí a manganem, známá jako dural. Tento materiál má oproti samotnému hliníku mnohem větší pevnost a tvrdost při zachování velmi malé měrné hmotnosti. Zároveň jsou i značně odolné vůči korozi. Všechny uvedené vlastnosti předurčují dural jako ideální materiál pro letecký a automobilový průmysl, ale setkáme se s ním při výrobě výtahů, jízdních kol, lehkých žebříků a podobných aplikacích.

Slévárenské slitiny hliníku

Sem patří hlavně slitiny Al-Si (siluminy), jedná se o nejrozšířenější slévárenské slitiny. Al-Si slitiny můžeme rozdělit na:

- - podeutektické 4,5 - 10 % Si
- - eutektické 10 - 13 % Si
- - nadeutektické nad 13 % Si

Dále se jedná o slévárenské slitiny typu Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Ni, Al-Cu, Al-Mg.

Slitiny určené k tváření

Slitiny určené k tváření se dělí podle toho, zda je možné jejich vlastnosti dále zvyšovat precipitačním vytvrzováním.

- - slitiny vytvrditelné (slitiny typu Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu)
- - slitiny nevytvrditelné (zejména slitiny Al-Mg, Al-Mn)

Využití slitin hliníku v praxi

- - strojírenství (odlitky, konstrukční součástky, různé profily, atd.)
- - automobilový průmysl (části motorů, profily pro výplně dveří, pouzdra tlumičů, atd.)
- - letecký průmysl (používají se slitiny na bázi Al-Li)
- - potravinářský průmysl (obalová technika - alobal)
- - elektrotechnika (kabely, dráty)



c) Elektrovodná měď – ECu

Hutnicky lze získat měď - Cu s čistotou nanejvýš 99,70 %. Elektrotechnická měď - ECu se získává elektrolýzou. Její čistota je až 99,94 %. Zbytek jsou nečistoty Au, Ag, Se.

Čistá měď je kov načervenalé barvy. Je velmi dobrý elektrický vodič, dobře vede i teplo. Měď je dobře tvárná, a to za studena i za tepla. Dobře se zpracovává při teplotách 600 až 900°C. Teplota tání je 1083 °C. Měď lze dobře pájet i svařovat. V suchém prostředí měď nekoroduje. Ve vlhkém prostředí se zvolna pokrývá zeleným povlakem měďěnky, který pak chrání měď před další korozi.

d) Ocel

Ocel je slitina železa, uhlíku a dalších legujících prvků, která obsahuje méně než 2,14 % uhlíku. V praxi jsou jako ocele označovány slitiny, které obsahují převážně železo a které je možno tvářet. Při obsazích uhlíku vyšších než 2,14 % hovoří se o litinách. Zde je uhlík vyloučen jako grafit nebo cementit. Může se vyskytovat ve více fázích (Austenit, Ferit, Perlit, Ledeburit, Cementit), které popisuje fázový binární diagram železo-uhlík.

Oceli jsou nejčastěji používanými kovovými materiály. Legováním uhlíkem a dalšími prvky a kombinací tepelného a tepelně-mechanického zpracování je možno ovlivnit vlastnosti ocelí v širokém rozmezí a tak jejich vlastnosti přizpůsobit zamýšlenému použití. Strukturální složky jsou popsány v binárním diagramu železo-uhlík. Hustota ocele je 7,85 g/cm³. Měrná tepelná kapacita oceli je cca 469J.kg⁻¹.K⁻¹ (závisí na obsahu příměsí). Bod tání oceli je 1500°C.

Ložisko je součást technického zařízení, které umožňuje přenos síly při vzájemném otáčivém nebo posuvném pohybu jeho dílů. Jeho historie se vyvíjí již od vynálezu kola.

1.6 Izolační systémy elektrických strojů

Snaha po zefektivnění elektrických strojů nutí konstruktéry vtěsnat do co nejmenších rozměrů co největší výkon. To se projevuje zvýšenými nároky na izolační systém a podtrhuje důležitost této části elektrických strojů. Výroba pak musí věnovat mimořádnou pozornost jeho vývoji, návrhu i technologii.



Izolační systémy jsou tvořeny izolací vodičů, drážkovou izolací a impregnantem. Izolace vodičů je tvořena lakem (smaltem), opředěním nebo ovinutím bavlnou, skleněnými vlákny, případně kombinací pevné a nanášené izolace. Drážková izolace se dělá z drážkové lepenky, či aramidového papíru v kombinaci s polyetylentereftalátovou fólií. Tato fólie se často kombinuje i s jinými materiály, se skleněnou tkaninou, polyesterovou rohoží a slídovým papírem. Kombinace vrstvených drážkových izolantů je závislá na napětí stroje a maximální provozní teplotě.

Impregnace vinutí se provádí nejčastěji máčením, vakuovým způsobem nebo zakapáváním. Impregnační laky jsou na bázi polyesterů nebo polyesterimidů.

1.6.1 Teplotní třídy izolačních materiálů

Důležitým hlediskem při provozu zařízení je provozní teplota. Klasifikace izolačních materiálů podle ČSN EN 60085 je provedena rozdělením do teplotních tříd.

Teplotní třídou je maximální hodnota teploty, pro kterou je materiál vhodný v provozu. Dříve byly teplotní třídy označovány velkými písmeny. Podle normy existují následující teplotní třídy: 70, 90(Y), 105(A), 120(E), 130(B), 155(F), 180(H), 200, 220, 250. Teplotní třída izolačního systému je výslednice a průnik tříd jednotlivých komponent systému.

Příklady izolačních materiálů pro nejdůležitější teplotní třídy:

- a) 90(Y): Papír, dřevo, bavlna, hedvábí, přírodní impregnanty, minerální oleje.
- b) 120(E): Tvrzený papír, přírodní tkanina v kombinaci s fenolickou pryskyřicí.
- c) 130(B): Skleněná vlákna nebo sulfátový papír v kombinaci s fenolickými pryskyřicemi nebo některými upravenými asfalty.
- d) 155(F): Kompozitní materiály ze skleněné tkaniny, epoxidové nebo polyesterové pryskyřice a slídového papíru, polyetylentereftalátové rohože a fólie, aramidové materiály, polyesterové laky.
- e) 180(H): Silikonové pryskyřice, modifikované epoxidové pryskyřice, aramidy, polyamidy, slídové materiály, skleněné tkaniny.



1.7 Teplotní simulace pomocí programu Ansys Workbench

Vytvoření geometrie modelu v programu Inventor. I přesto že Ansys Workbench obsahuje prostředí pro vytváření geometrie modelu, je daleko snazší přistoupit k tvorbě modelu v programu Autodesk Inventor, z důvodu horší zpracovanosti tohoto prostředí.

Parametry motoru

$P=1,1\text{kW}$

$U=400\text{V}$

$n=2845\text{ot/min}$

$\cos\phi=0,87$

$I=2,4\text{A}$

účinnost: 77%

Ztráty:

mechanické $dP_m=53\text{W}$

v železe $dP_{fe}=105\text{W}$

Jouleovy ve statoru: $dP_{j1}=160\text{W}$

Jouleovy v rotoru $dP_{j2}=65\text{W}$

dodatečné $dP_d=16\text{W}$

1.7.1 Vytvoření modelu

a) Tvorba geometrie

Pomocí Autodesk Inventoru je možné:

- Vytvářet 2D a 3D náčrty, 3D modely a 2D výrobní výkresy.
- Vytvořit adaptivní konstrukční prvky, součásti a pod sestavy.
- Zachytit kinematické „snímky“ sestav v různých polohách.
- Upravovat zobrazení sestavy pomocí ovládání viditelnosti komponentu.
- Spravovat tisíce součástí a rozsáhlé sestavy.
- Používat externí aplikace s rozhraním API (Application Program Interface).
- Používat rozhraní API Autodesk Inventoru ve spojení s VBA. Automatizovat opakované úkoly pomocí programů.

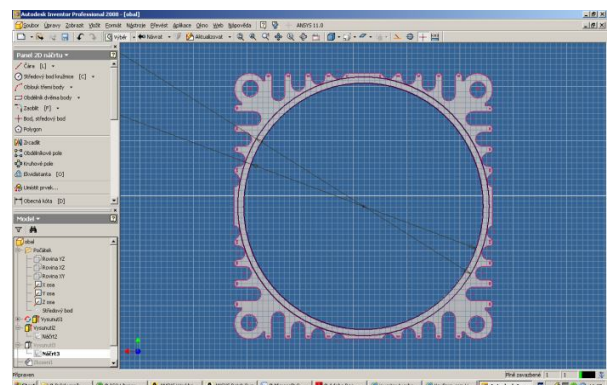
Do Autodesk Inventoru lze importovat soubory SAT, STEP, IGES a také soubory AutoCADu®/Autodesk® Mechanical Desktopu® (DWG). Exportovat soubory Autodesk Inventoru do formátu AutoCADu, Autodesk Mechanical Desktopu, IGES a STEP. Při modelování spolupracovat s více konstruktéry.

Pomocí internetových nástrojů získat přístup ke zdrojům informací, sdílet data a komunikovat se svými spolupracovníky. Využívat při práci integrovaný DSS (Design Support System).

b) Tvorba součástí

Prvním krokem při vytváření součásti je vytvoření náčrtu.

Geometrie náčrtu se tvoří a upravuje v prostředí náčrtu pomocí nástrojů funkce náčrtu.

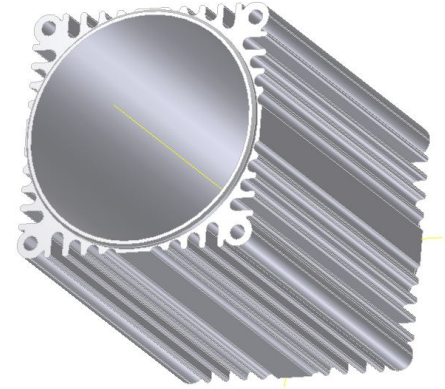


Obrázek 8 - Náčrt

Je možné tak vytvořit rastr náčrtu a nakreslit čáry, spline, kružnice, elipsy, oblouky, obdélníky, polygony nebo body. Dále je zaoblit rohy, prodloužit

nebo ořezat křivky a odsadit či promítnout geometrii projektu pomocí ostatních konstrukčních prvků. Je-li požadavkem, aby byl náčrt zahájen od začátku, musí se otevřít nový soubor součásti, vybere se nástroj *Náčrt* a v grafickém okně se může začít tvořit náčrt.

Při tvorbě náčrtu jsou na různé prvky náčrtu automaticky použity vazby. Libovolnou vazbu náčrtu lze upravit nebo odstranit. Vazbu lze také přidat ruční libovolnému prvku náčrtu. 3D model lze vytvořit z náčrtu vytažením profilu nebo rotací profilu okolo osy.



Obrázek 9 - Vysunutí

c) Vytvoření sestavy součástí

Vzhledem k tomu, že většina strojů a mechanismů se skládají s více částí, tak se musí nejprve tyto části vytvořit zvlášť a potom je lze spojit v sestavu.

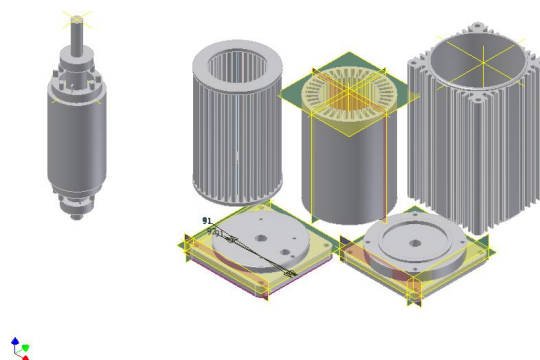
Modelování sestav kombinuje strategie umístování existujících komponentů do sestavy a tvorbu dalších komponentů na místě

v kontextu sestavy. V obvyklém procesu modelování jsou již některé komponenty hotové, jiné se použijí

jako normalizované komponenty, a pro ostatní je nutné vytvořit nové návrhy.

Do souboru sestavy lze umístit více komponentů pomocí jedné operace přetažením komponentů v grafickém okně.

První komponentem umístěným v sestavě by měla být základní součást nebo podsestava, například základní deska nebo rám, ze kterého je vytvořen zbytek sestavy. První



Obrázek 10 - Sestava



komponent sestavy určuje orientaci všech následujících součástí a podsestav. Počátek součásti je totožný s počátkem souřadnic sestavy a součást je pevná (jsou odstraněny všechny stupně volnosti).

V případě nutnosti je možné obnovit stupně volnosti pevné součásti (základního komponentu) a znovu ji umístit. Komponenty, které jsme spojili pomocí vazeb, se budou také pohybovat. Je dobré umísťovat součásti a podsestavy v pořadí, v jakém by byly sestaveny při výrobě. I když v sestavě není mezi komponenty rozdíl, je možné první umístěný komponent sestavy považovat za základní, protože to je obvykle důležitý komponent, ke kterému jsou obvykle vazbami připojeny ostatní komponenty.

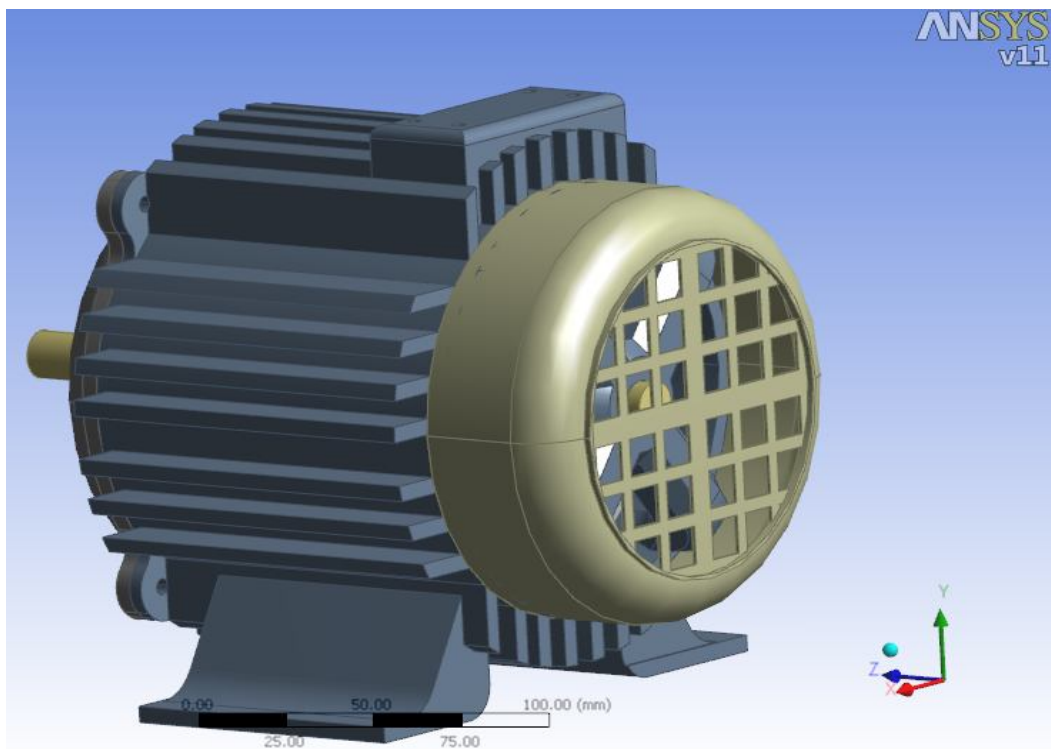
Jestliže umístíte první komponent a potom chceme mít jako základní komponent jiný komponent, můžete umístit nový komponent, označíme jej jako pevný a potom změníme vazby u dříve umístěných částí, včetně prvního komponentu. Klepneme pravým tlačítkem na první komponent, v nabídce vypnete volbu Pevné a spojte jej pomocí vazeb s novým základním komponentem.

Neexistuje omezení počtu pevných komponentů, ale většina sestav má pouze jeden pevný komponent. Pevné komponenty jsou vhodné pro pevné objekty v sestavách, protože jejich pozice je absolutní a všechny stupně volnosti jsou odstraněny. Pevné komponenty nejsou závislé na jiných komponentech.

Při sestavení soustavy motoru, musíme přistoupit k jejímu uložení. I když je Ansys Workbench schopný importovat přímo z CAD systému, je daleko vhodnější uložit kopii soustavy do jiného kompatibilního formátu. Mezi nejlepší a nejpoužívanější formáty patří formát *.sat nebo *.iges.

1.7.2 Simulace

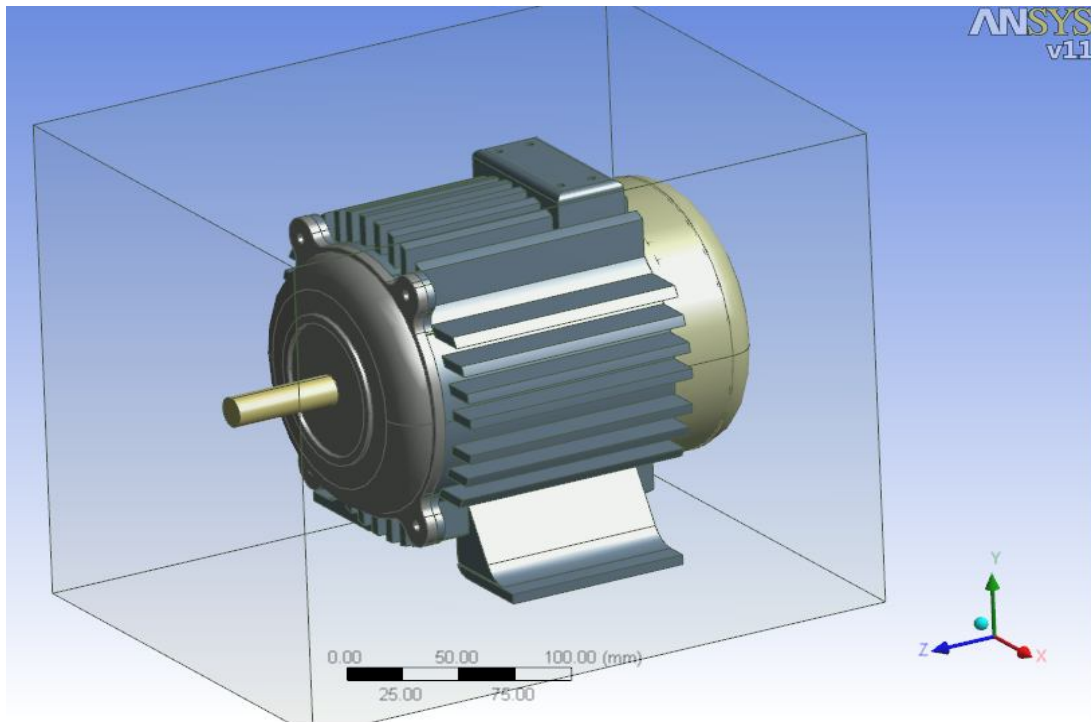
1. Po uložení geometrie v podporovaných formátech, spustíme Ansys Workbench.
2. Z nabídky vybereme prázdný projekt. V této chvíli musíme uloženou geometrii importovat.
3. Zvolíme z nabídky: File/Import external geometry file.
4. Stiskneme tlačítko generace (Generate), z následující nabídky vybereme měřítko (mm).
5. V této chvíli se objeví na obrazovce importovaný model.



Obrázek 11 - Importovaný model

6. Z nabídky tools vybereme příkaz enclosure, tento příkaz slouží k uzavření modelu do kapsy (v našem případě vzduchové). V nastavení enclosure zvolíme geometrii, kterou

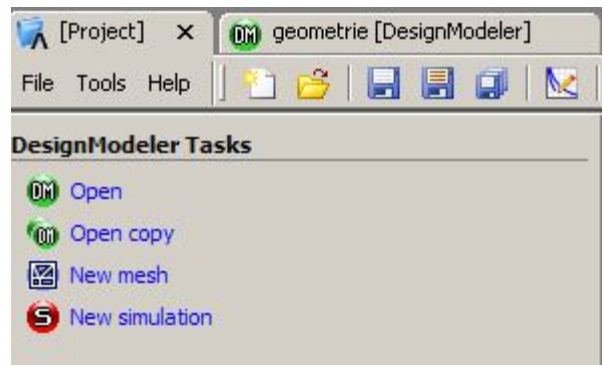
chceme uzavřít, její vzdálenost od modelu a její materiál (vzduch).



Obrázek 12 - Enclosure (prostředí)

7. Přestoupíme do aplikace simulace tím, že v záložce Project vybereme tlačítko New simulation.
8. Aby bylo možné vytvořit výpočet simulace, je nutné vytvořit konečnoprvkovou síť na řešené simulaci:

Vybereme složku Mesh



Obrázek 13 - Spuštění simulace

a) Tvorba konečnoprvkové sítě obsahuje další nabídky:

Na plochy tvořené 4 body je vhodné použít místo volného meshování tzv. mapovaný mesh (mapped face mesh). Jeho vytvořením se vytvoří pravidelná síť. V některých případech je nutné síť zjemnit,

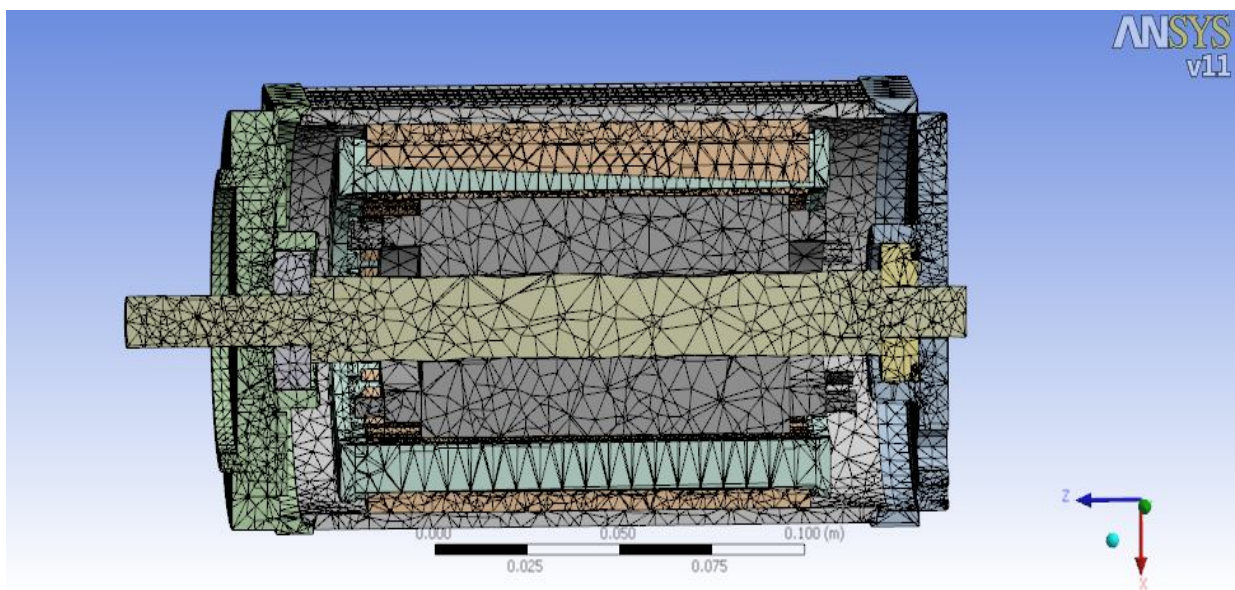


Obrázek 14 - Tvar tetrahedronu

to můžeme udělat několika způsoby, buď pomocí nabídky Part relevance, kde zadáváme počet prvků v rozsahu 0-100%.

Pro tuto úlohu bude nejvhodnější zvolit metodu meshování tetrahedrons, jež vyplní objem modelu čtyřstěny, jejichž stěny tvoří trojúhelníky.

Při vytváření meshe musíme dbát na oblasti, na které je zaměřen výpočet, protože u těchto oblastí je nutné, aby jednotlivé součásti, i když jsou malé, obsahovaly alespoň dva uzly nebo více. Nedodržení tohoto pravidla může mít velký vliv na přesnost výpočtu.



Obrázek 15 - Mesh kostry1

b) Materiály použité pro simulaci

Okolní prostředí vzduch

- Měrná vodivost: 1 W/m.K
- Měrné tepelná kapacita: 1 J/kg.K
- Hustota: $1,127 \text{ kg/m}^3$



Hliníkové části

- Měrná vodivost:

-100° C	114 J/kg.K
0° C	144 J/kg.K
100° C	165 J/kg.K
200° C	175 J/kg.K
- Měrné tepelná kapacita: 875 J/kg.K
- Hustota: 2770 kg/m³

Součásti z šedé litiny

- Měrná vodivost: 52 W/m.K
- Měrné tepelná kapacita: 447 J/kg.K
- Hustota: 7200 kg/m³

Vinutí z mědi

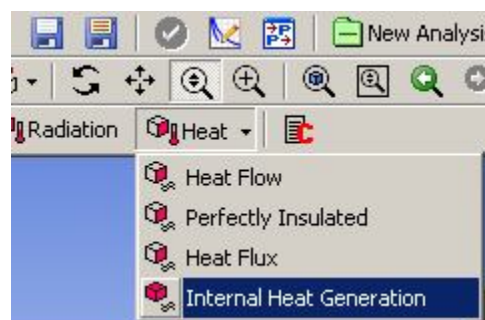
- Měrná vodivost: 401 W/m.K
- Měrné tepelná kapacita: 385 J/kg.K
- Hustota: 8300 kg/m³

Části z oceli

- Měrná vodivost: 60,5 W/m.K
- Měrné tepelná kapacita: 434 J/kg.K
- Hustota: 7850 kg/m³

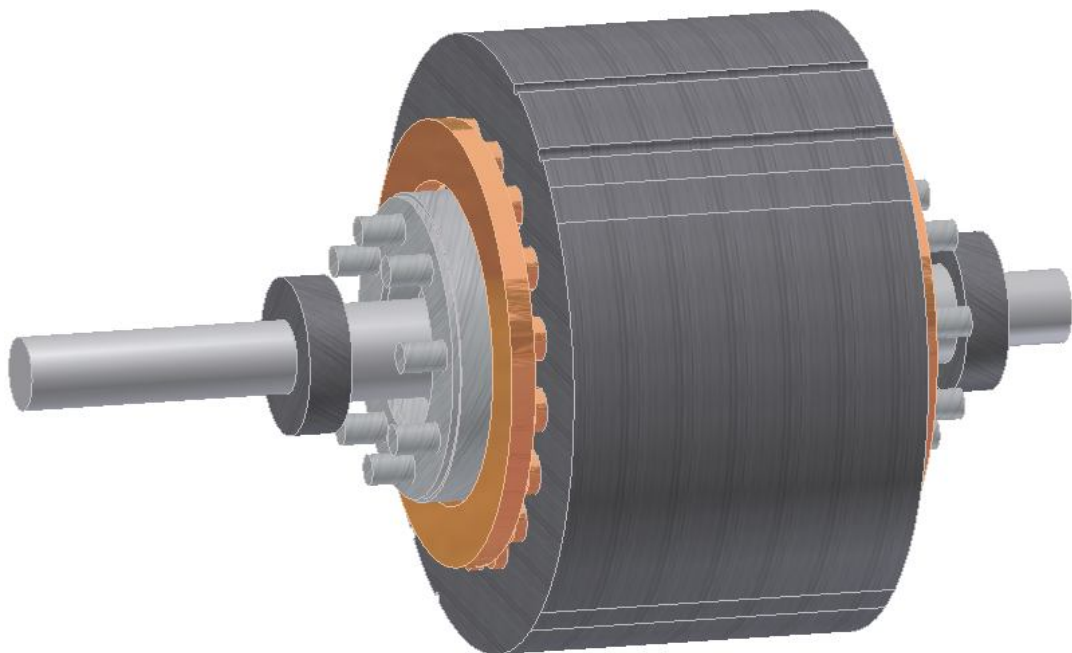
c) Nastavení ztrát

1. V menu zvolíme tlačítko New analysis a vybereme volbu Treansient Thermal.



Obrázek 16 - Zadání ztrát

2. Z nabídky Environment zvolíme položku Heat\Internal heat generation, je to vnitřní tepelné vyzařování (tepelné ztráty), které se zadává v jednotce W/m^3 . Je tedy nutné vypočtené ztráty přepočítat na objem těles.



Obrázek 17 - Motor

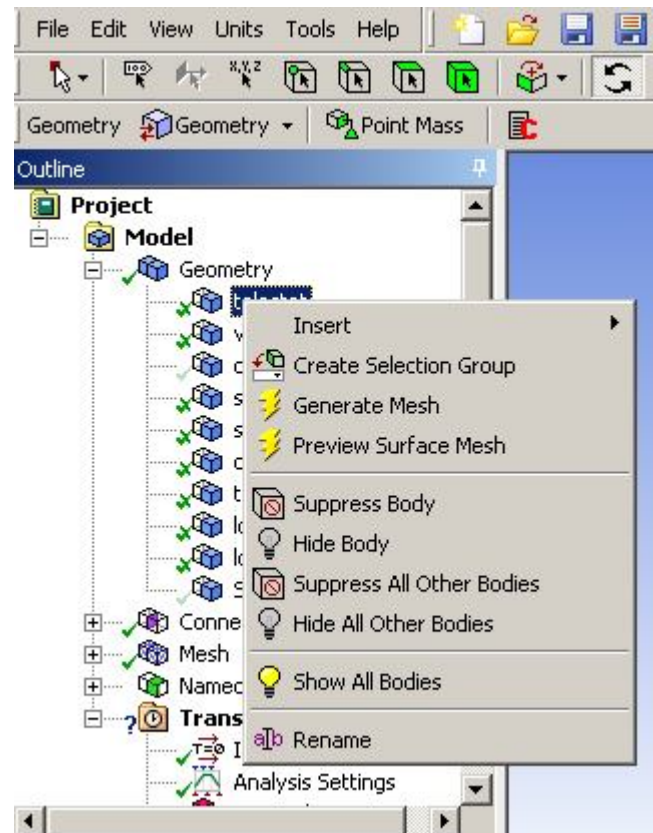
3. Přiřazení ztrát jednotlivým částem asynchronního motoru

- Statorové vinutí	$\Delta P_{j1}=160W$
- Rotorová klec	$\Delta P_{j2}=65W$
- Ložiska	$\Delta P_m=53W$
- Plechy	$\Delta P_{Fe}=105W$

4. Musíme nastavit teplotu stran Enclosure, tedy teplotu okolního vzduchu.

Pravým tlačítkem na *Transient Thermal / Insert / Temperature*. Na horní liště přepneme na výběr povrchu *Face* . V detailech *Temperature* vybereme *Geometry* a označíme povrch vzduchové kapsy. Teplota zůstane nastavena na $22^{\circ}C$.

Při těchto operacích je vhodné použití funkcí Hide Body tedy zneviditelnění námi vybraného objemu. To provedeme kliknutím pravého tlačítka myši na vybraný objem a vybráním této funkce.



Obrázek 18 - Funkce Hide body

d) Nastavení simulace:

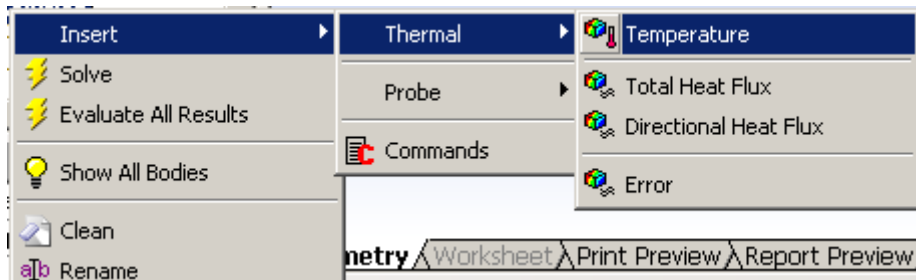
U všech čtyř úloh jsem použil shodné nastavení simulace, tedy doba simulace má trvat hodinu, z toho půl hodiny bude motor v provozu a půl hodiny se bude ochlazovat.

Nabídka nastavení simulace nabízí široký rozsah nastavení. Délka simulace je udávána ve vteřinách, pro nastavení simulace na 1 hodinu tedy musíme zadat Step End Time na hodnotu 1800s pro první krok a 3600s pro druhý krok. Minimální krok je nastaven jako 1s, maximální krok 400. Počet kroků jsem nastavil na 2. První krok oteplování, druhý krok ochlazování.

Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	3600, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Initial Time Step	1, s
Minimum Time Step	1, s
Maximum Time Step	400, s
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Iterative
Nonlinear Controls	
Output Controls	

Obrázek 19 - Nastavení časových údajů simulace

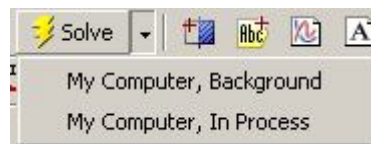
Pokud máme hotova všechna nastavení simulace, musíme vybrat způsob řešení. Otevřeme pravým kliknutím myši nabídku Solution/Insert/Thermal/Temperature. Proběhne vložení grafického řešení simulace.



Obrázek 20 - Funkce grafického řešení teploty

e) Řešení simulace

V této chvíli zbývá spuštění řešení simulace. To spustíme výběrem tlačítka Solve. Zvolit můžeme, ze dvou možností My Computer, Background, tedy řešení na pozadí, nebo My Computer, In process.

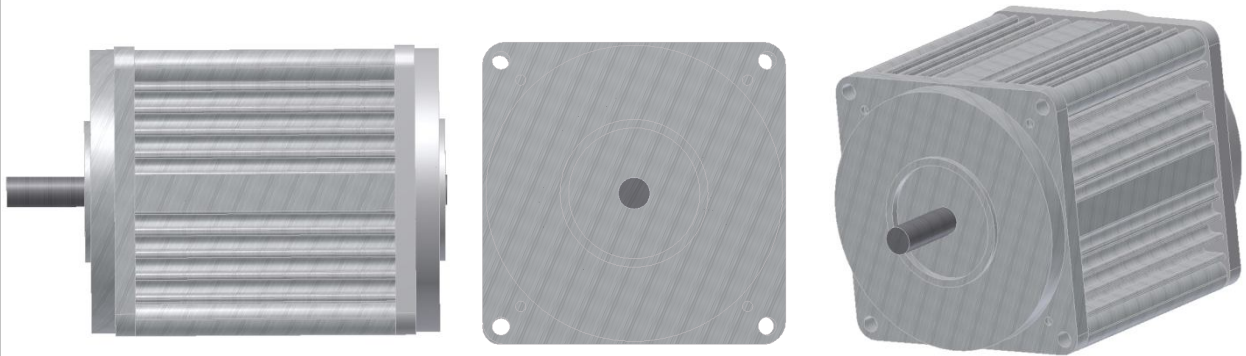


Obrázek 21 - Nabídka řešení

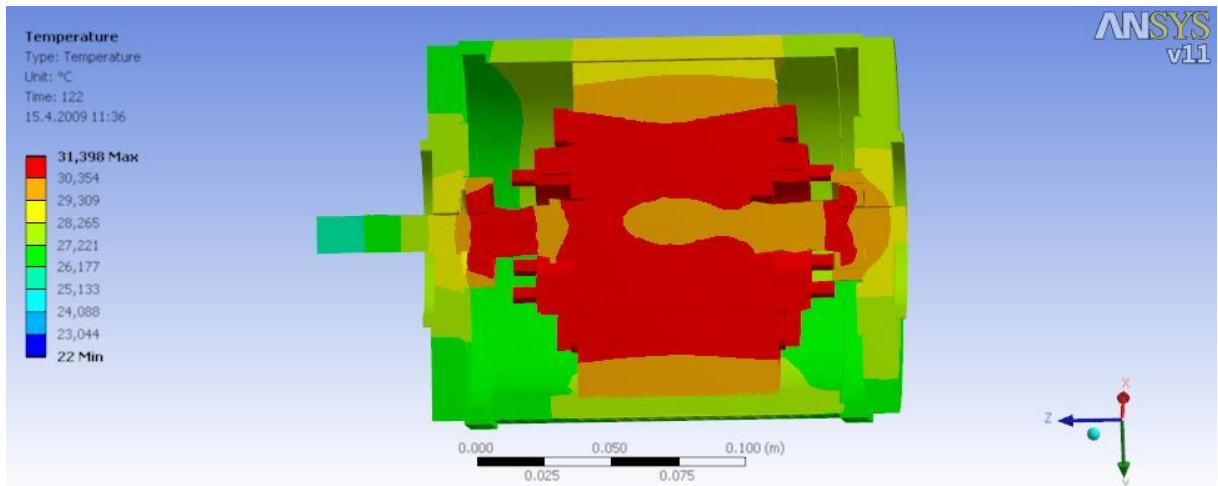
Výpočet může zabrat velmi dlouho dobu, ta závisí jak na počtu elementů, tak i na použitém hardwaru. V mém případě výpočet trval kolem 16 hodin při dynamické analýze, kdy motor půl hodiny běžel a půl hodiny se chladil.

1.8 Výsledky

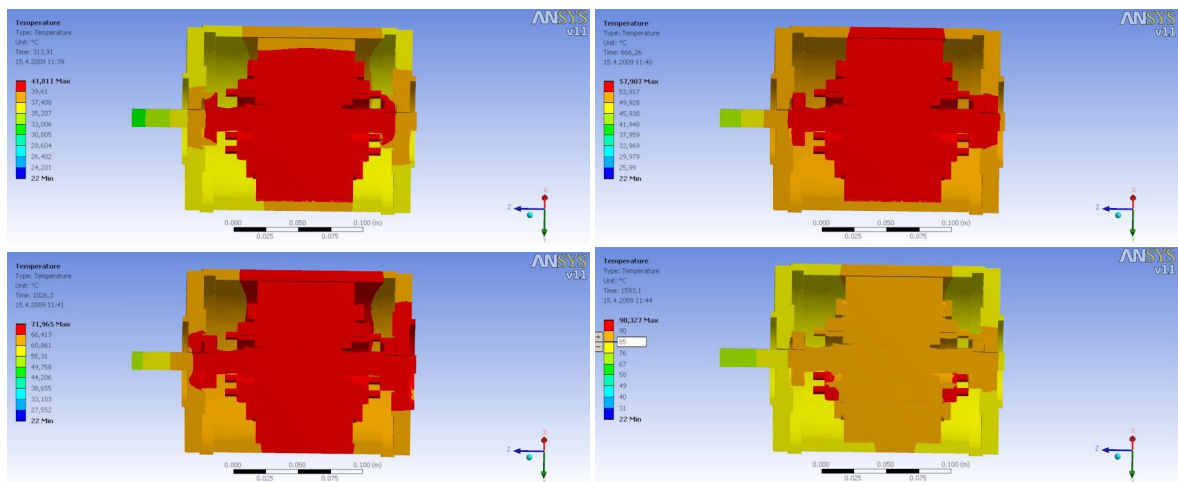
Kostra 1

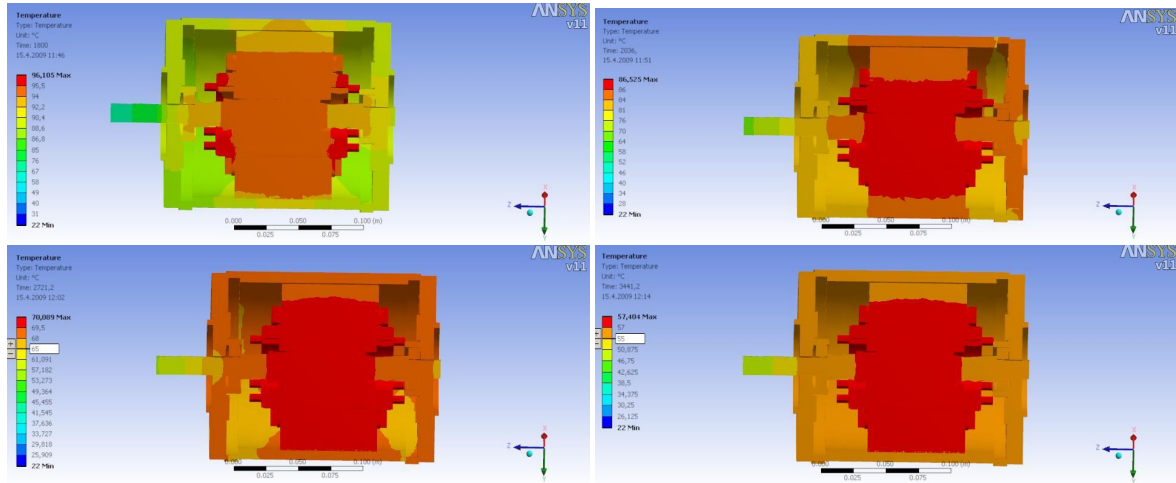


Obrázek 22 - Tvar kostry 1



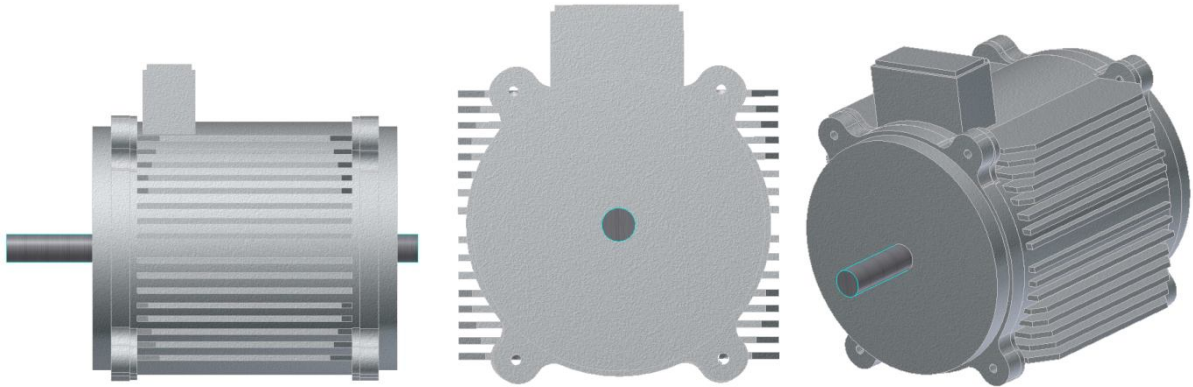
Obrázek 23 – Řez kostrou 1 $t=122s$



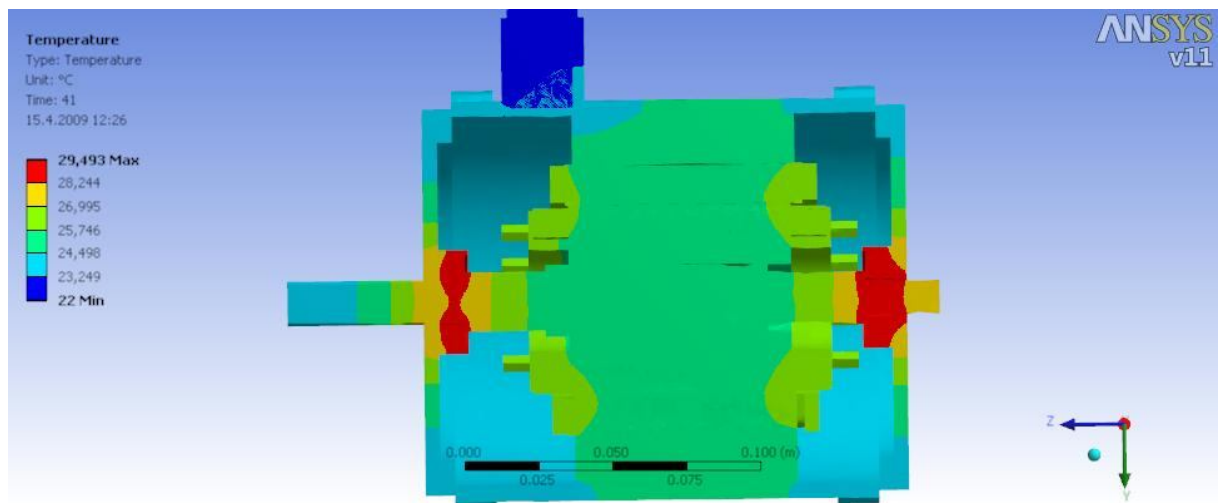




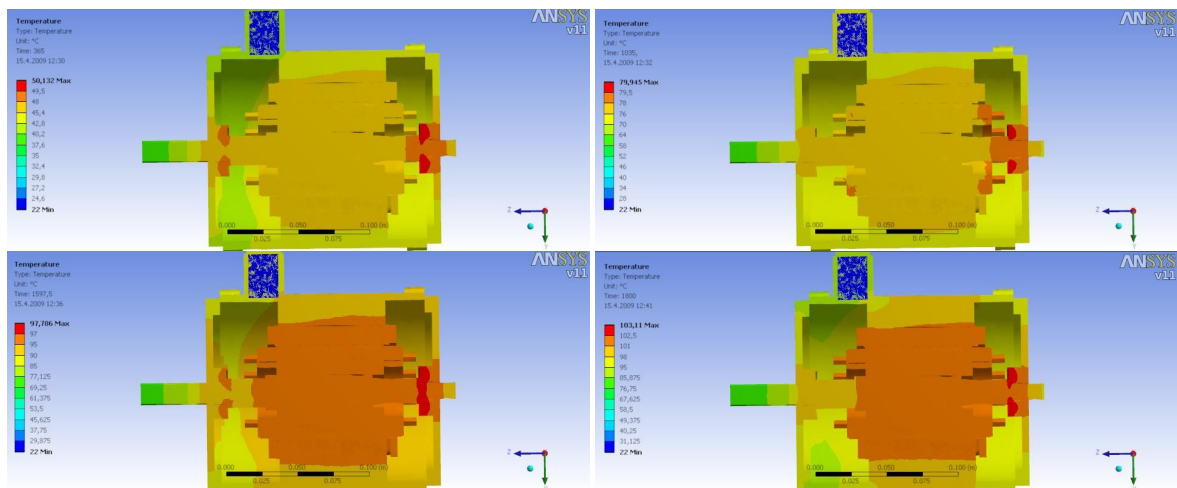
Kostra 2

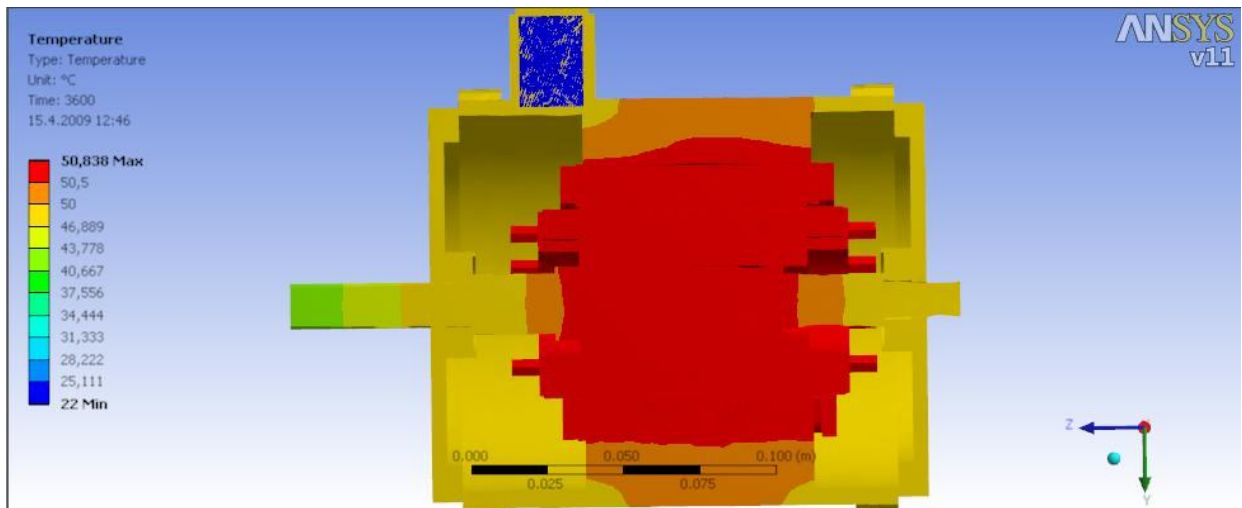
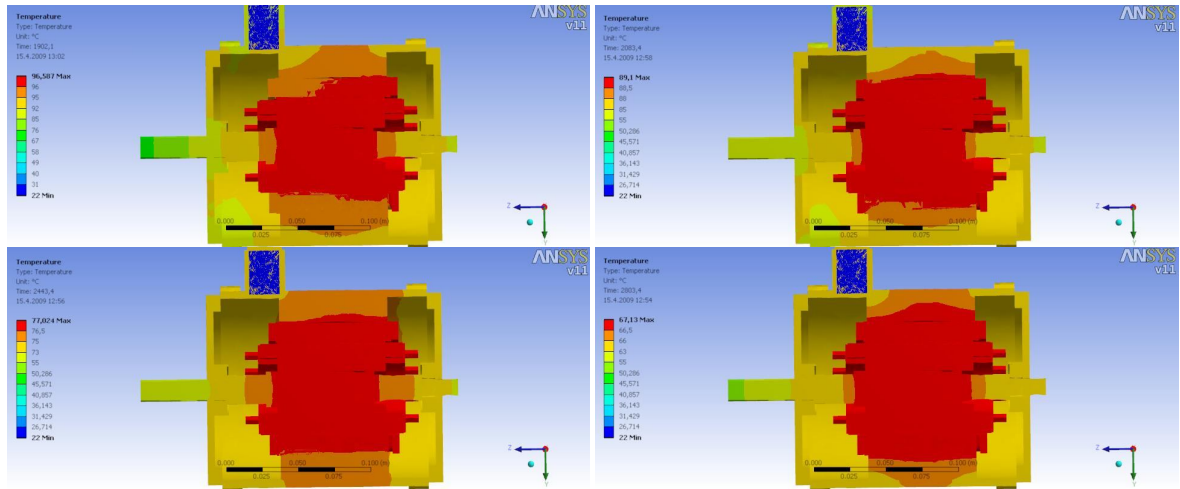


Obrázek 26 - Tvar kostry 2

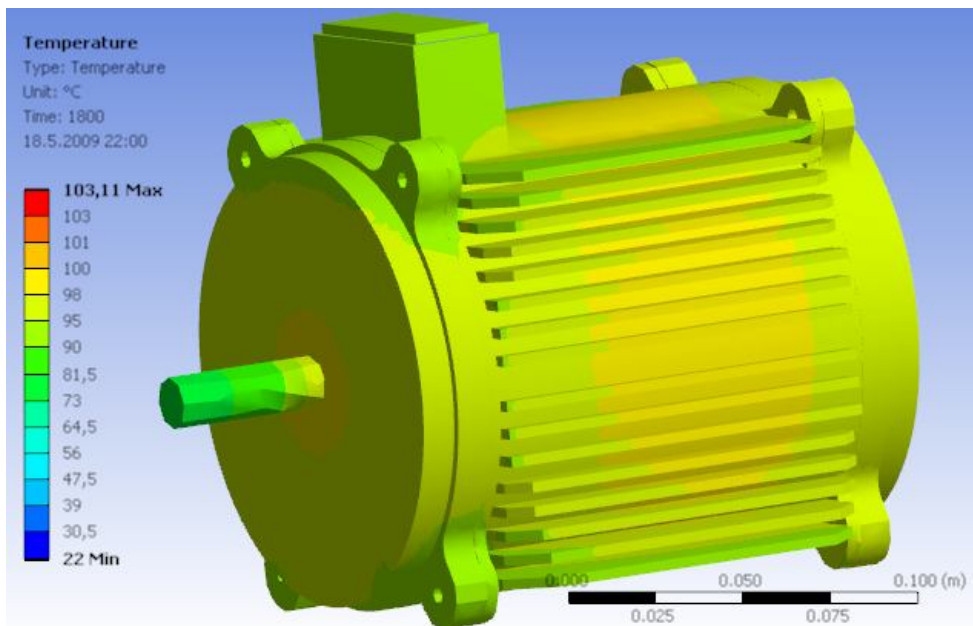


Obrázek 27 – Řez kostrou 2 v $t=41s$



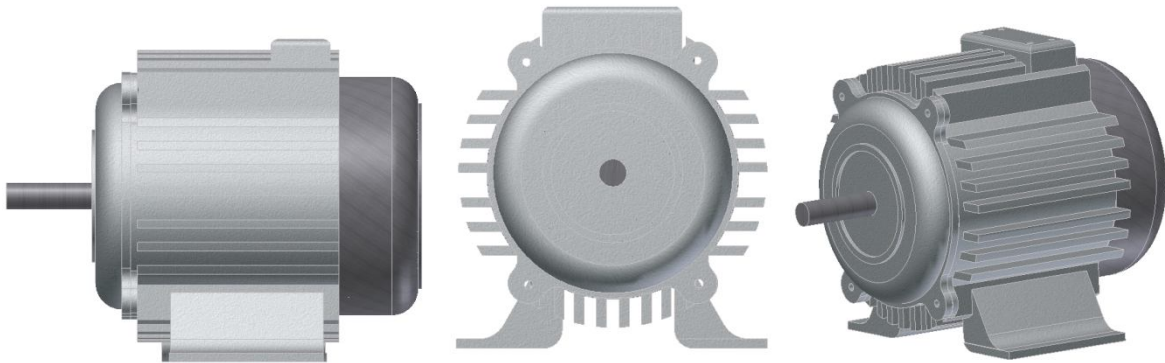


Obrázek 28 – Řez kostrou 2 v $t=3600s$

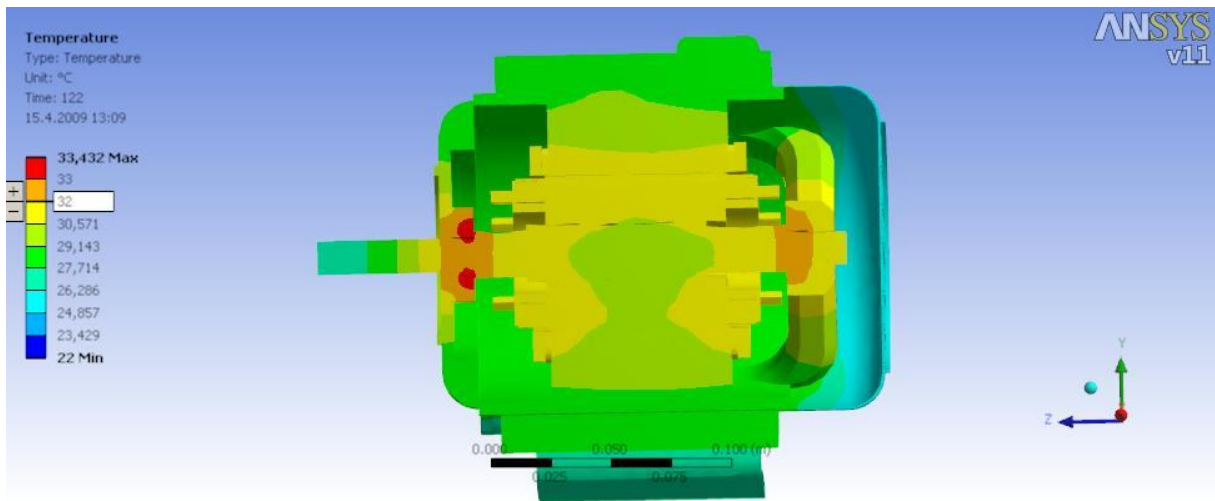


Obrázek 29 - Pohled na kostru 2 při maximální teplotě

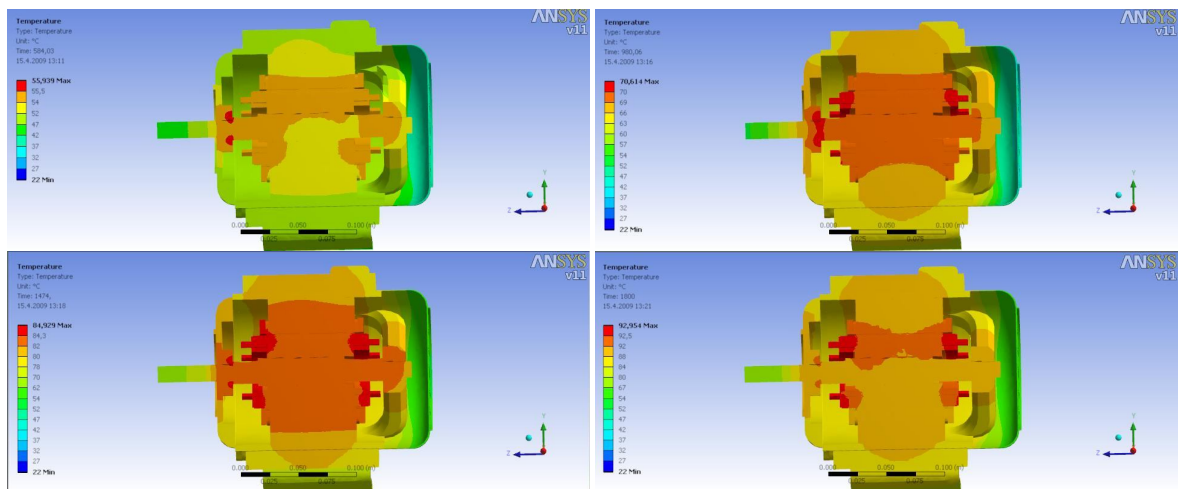
Kostra3-Hliníková

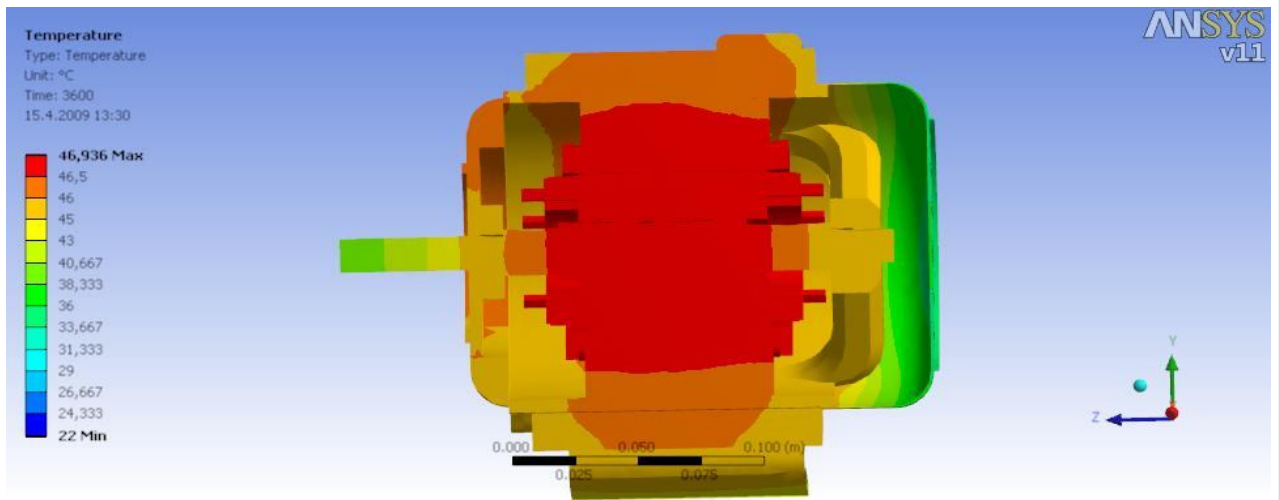
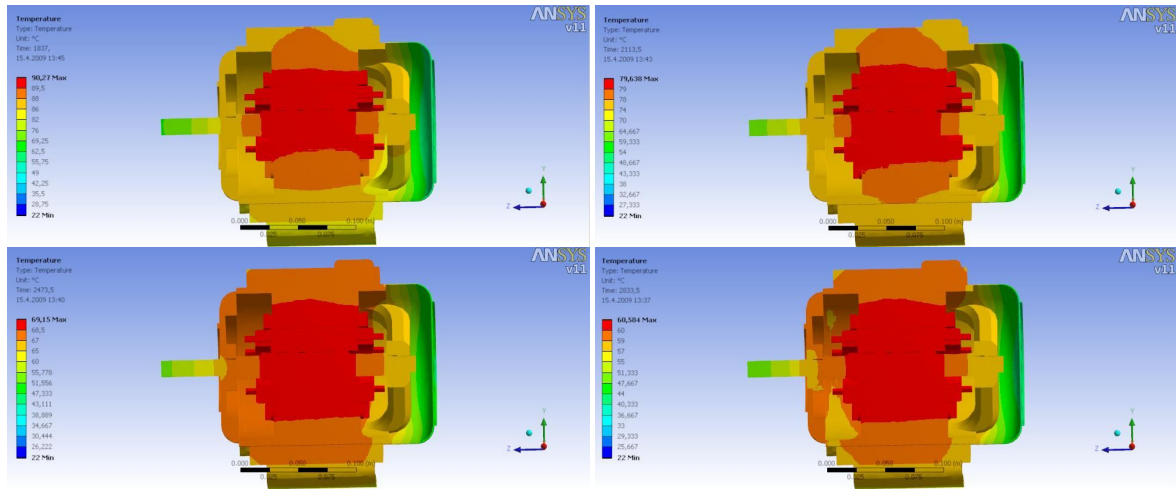


Obrázek 30 - Tvar kostry 3

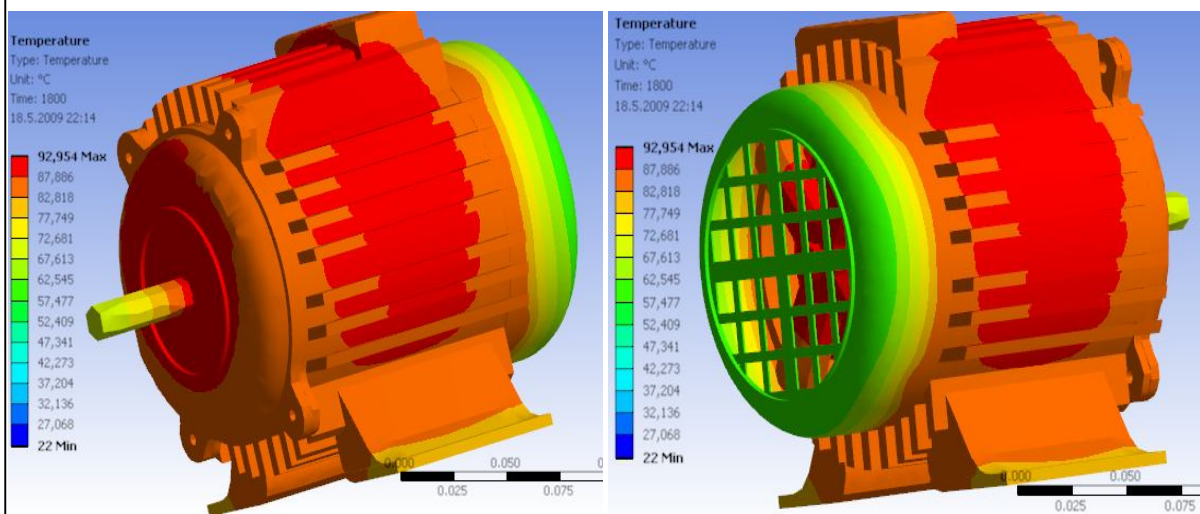


Obrázek 31 -Řez kostrou 3Al v $t= 122s$



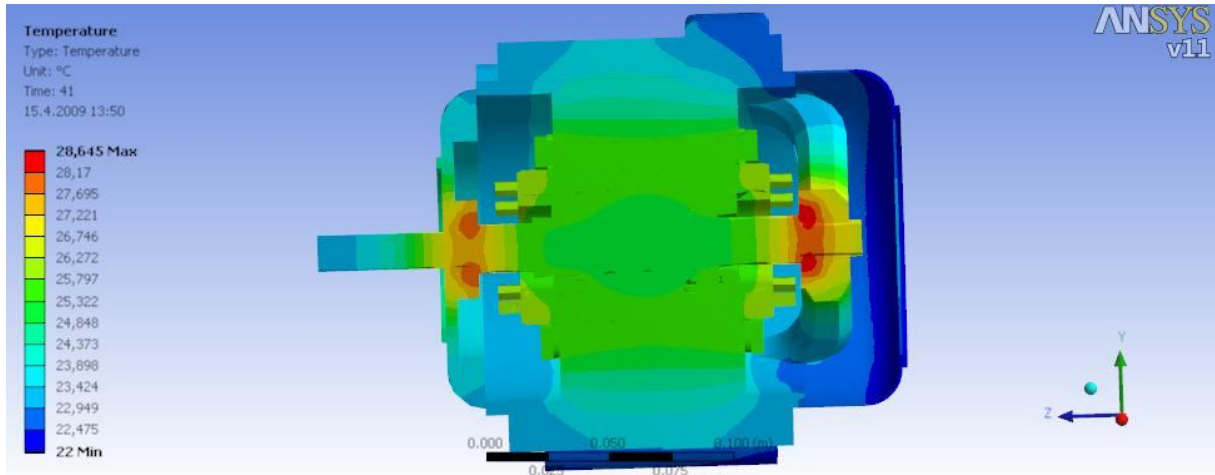


Obrázek 32 - Řez kostrou 3Al v $t=3600s$

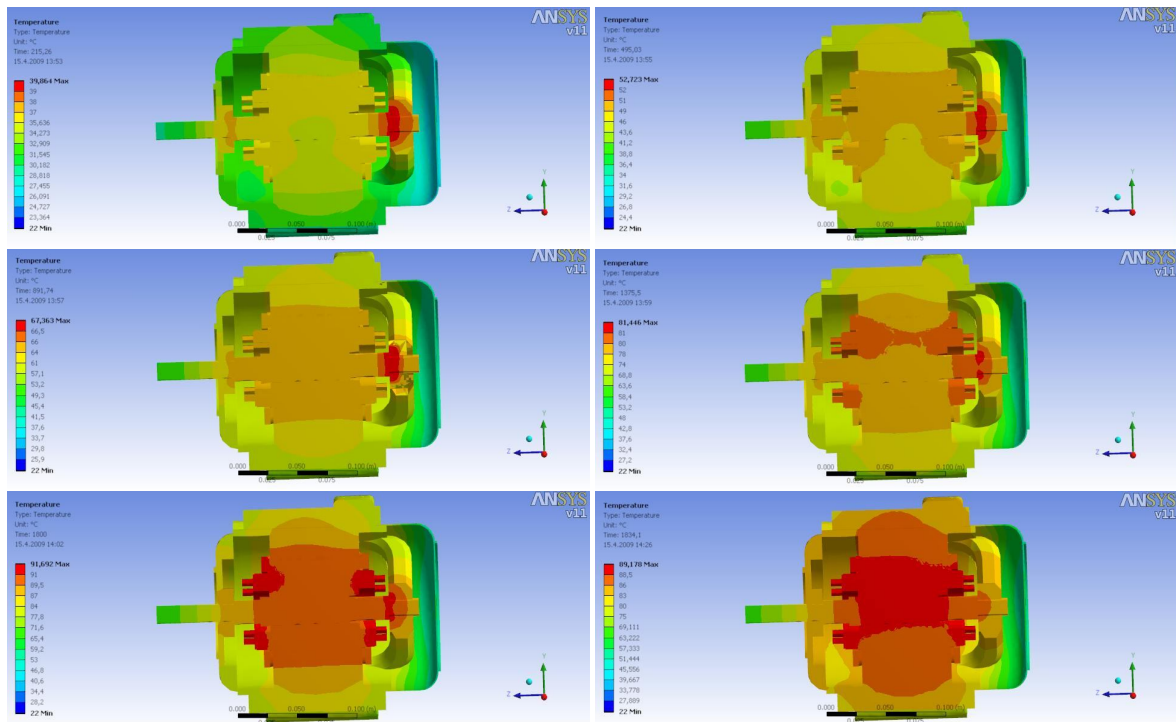


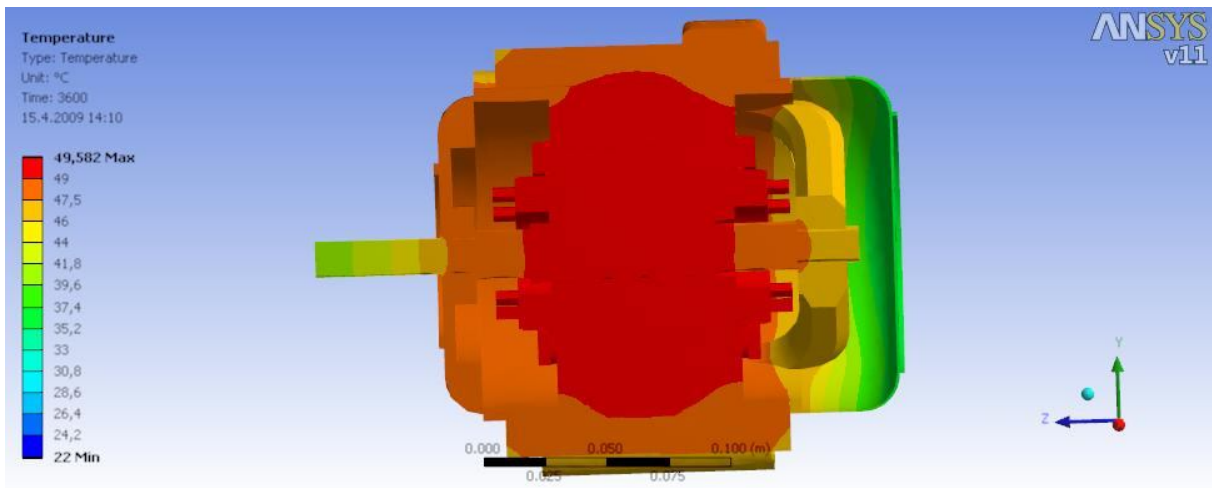
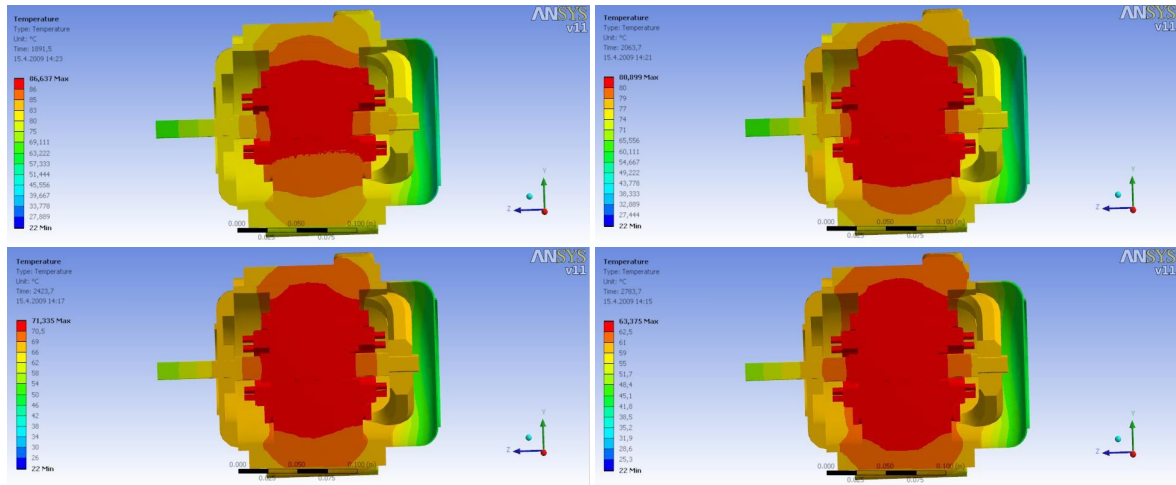
Obrázek 33 - Pohled na kostru 3Al při maximální teplotě

Kostrá3 – Šedá litina

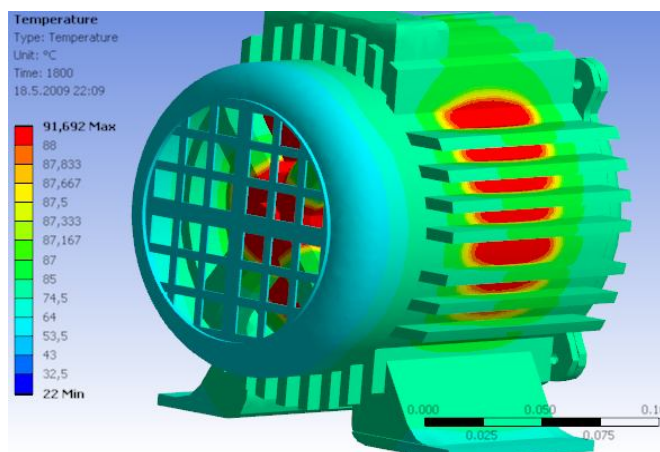


Obrázek 34 - Řez kostrou 3 v $t=41s$





Obrázek 35 - Řez kostrou 3 v $t = 3600s$

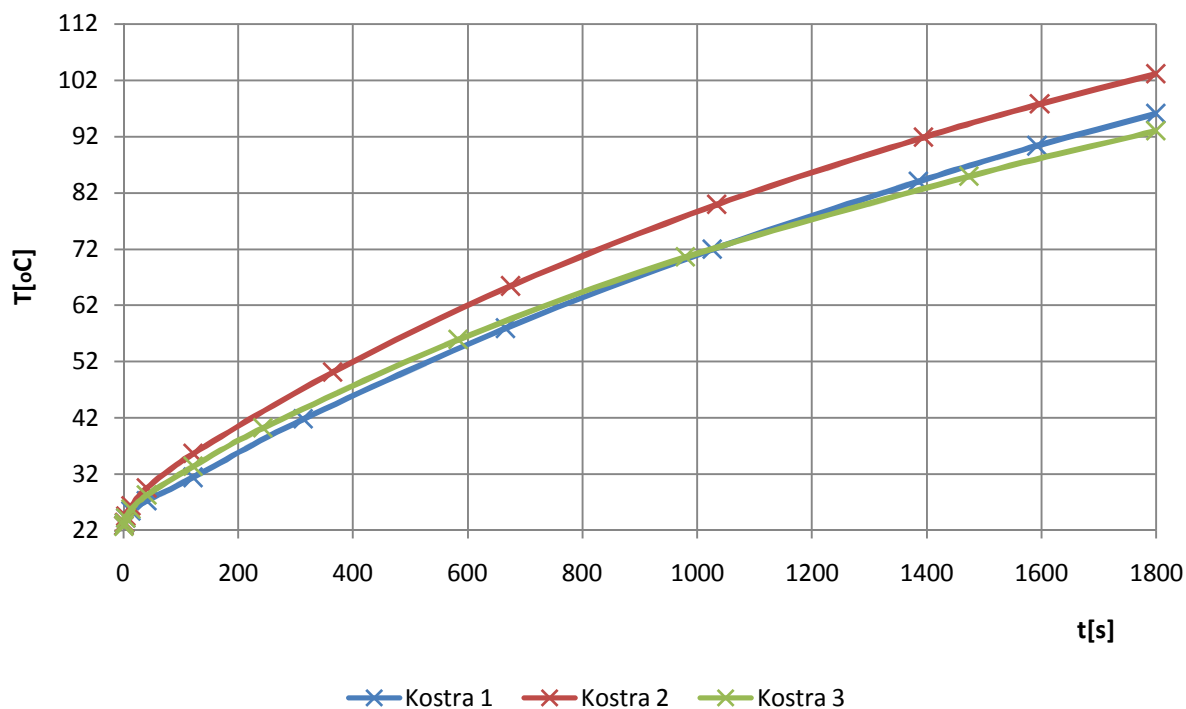


Obrázek 36 - Pohled na kostru 3 při maximální teplotě

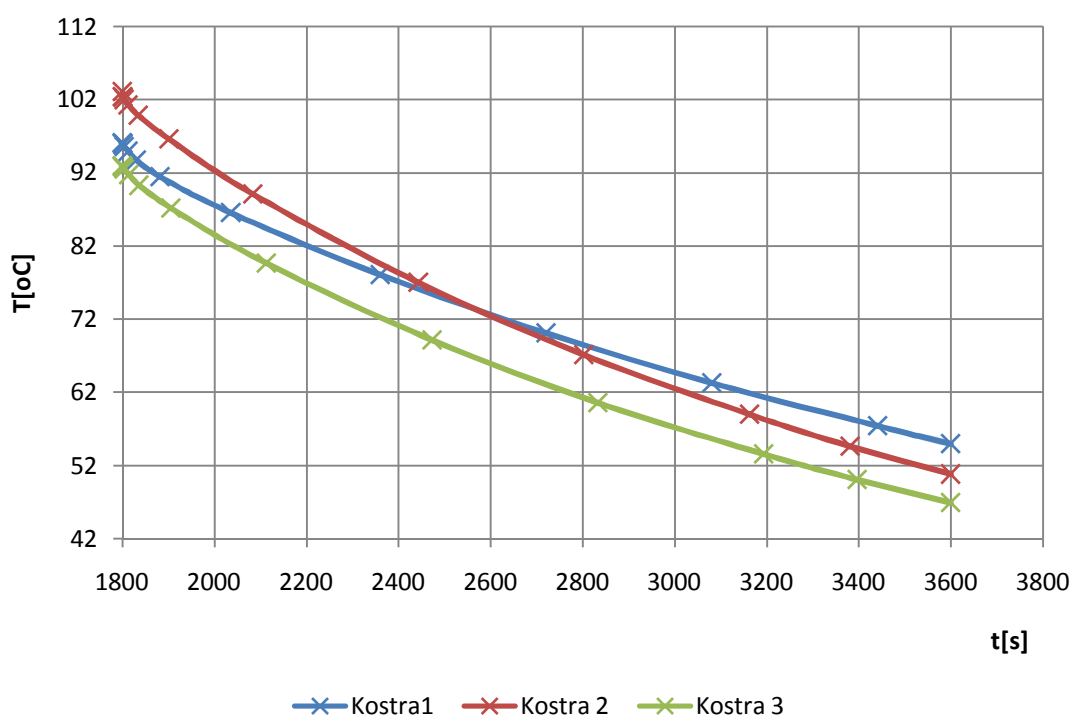
Oteplovací charakteristiky

Srovnání maximální teploty jednotlivých tvarů koster

Srovnání oteplovacích charakteristik koster z Al



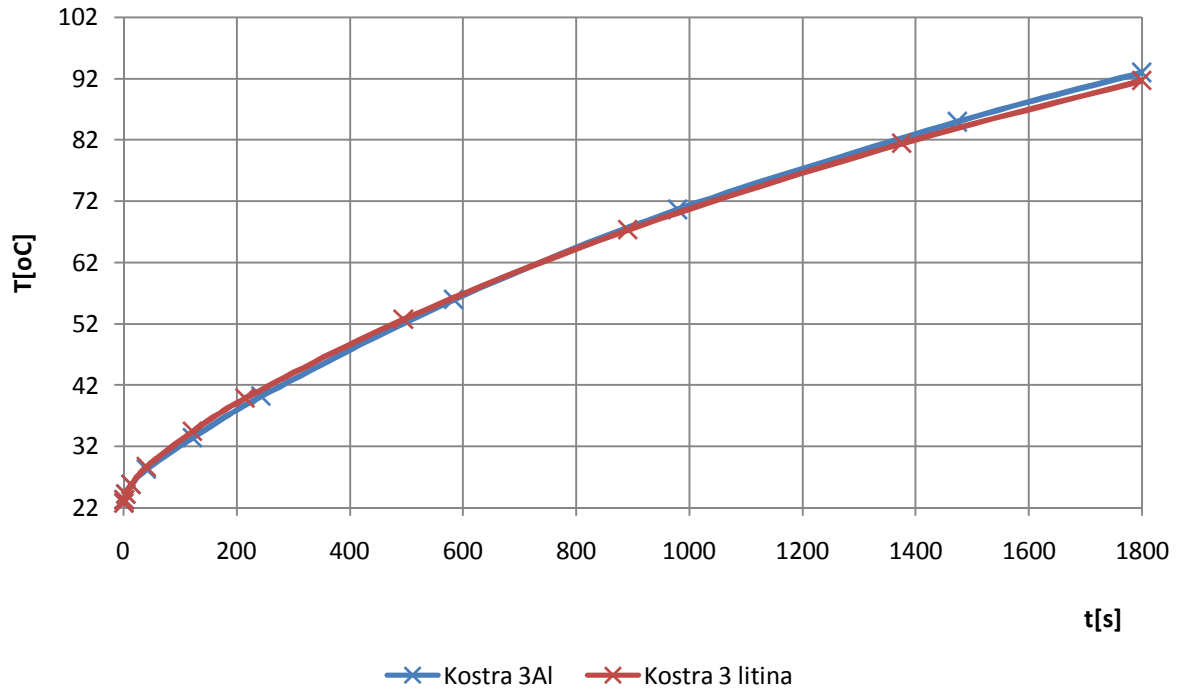
Ochlazovací charakteristiky koster z Al



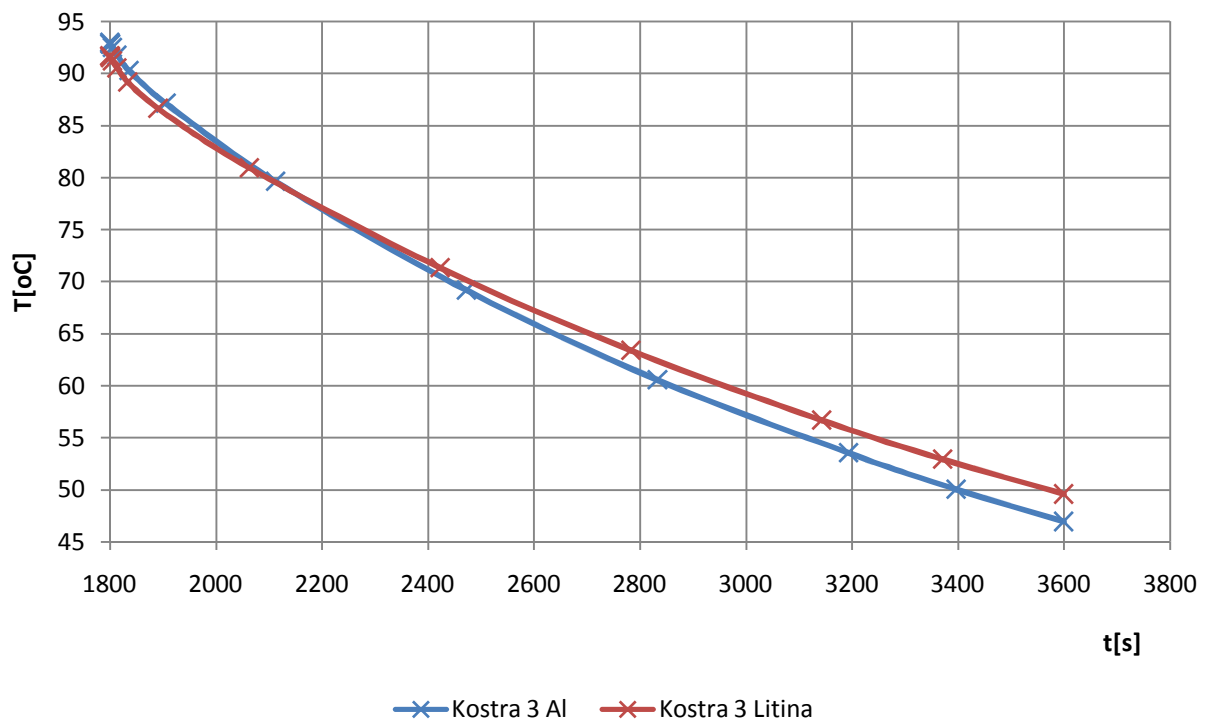


Porovnání materiálů použitých na kostru 3

Porovnání oteplovacích charakteristik kostry 3



Ochlazovací charakteristiky kostry 3





2 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vytvoření reálného teplotního modelu asynchronního motoru. Program Ansys Workbench je jedním z programů využívajících tuto metodu. Pomocí něj jsem vytvořil tři druhy koster pro tepelný model.

Jednou z nejdůležitějších částí tvorby modelu je vytvoření geometrie modelu. Pro tuto část jsem zvolil program společnosti Autodesk Inventor, jelikož použití součásti Ansys Workbench je pro tvorbu složitějších modelů složitě a náročné na čas.

Geometrii vytvořenou v Autodesk Inventor je nutné exportovat do formátu kompatibilního s produktem Ansys. Pro tyto účely je vhodné použití formátu *.igs nebo *.sat. Pro tuto simulaci jsem zvolil formát *.igs z důvodu bezproblémového importu. U ostatních formátů včetně *.sat došlo k uvolnění vazeb, nebo následnému roztržení modelu.

Je nutné si uvědomit, že samotná simulace se neprovádí z importovaného modelu. Pro simulaci je nutné vytvoření konečnoprvkové sítě, neboli „meshe“. Tato síť je velmi důležitá. Zvláště u malých objemů je nutné dbát na to, aby byl objem tvořen alespoň dvěma elementy. V případě, že je malý objem tvořen pouze jedním elementem může dojít ke značné chybě. Samozřejmě platí, čím více prvků (elementů) tvoří objem, tím bude simulace přesnější. Na druhou stranu je třeba dbát i na dobu výpočtu, jelikož čím více prvků tvoří model, tím bude výpočet trvat déle.

Pro vytvoření sítě jsem zvolil metodu tetrahedrons, kde je objem modelu tvořen čtyřstěny, jehož stěna má tvar trojúhelníkem. Tato metoda se používá hlavně u válcových objemů. Na stěnách tvořených čtyřmi stranami byl použit mapovaný mesh. Popřípadě zjemnění sítě na potřebných místech. Při nastavování samotné simulace je nutné nastavení okrajových podmínek, jako jsou teplota okolí a tepelný zdroj. Teplota okolního prostředí je 22°C.

Srovnání teplot jednotlivých koster:

Z grafů porovnání maximálních teplot jednotlivých koster lze vidět nejvyšší dosaženou teplotu u modelu Kostra 2 dosahuje 103,11°C v čase 1800s. Tato teplota byla dosažena na zadním ložisku motoru. Vinutí kostry 2 nepřesáhlo teplotu 102,5°C. Po dokončení ochlazování byla maximální teplota vinutí 50,83°C. Kostra 1 z hliníku čtvercového průřezu měla maximální teplotu 96,1°C v čase 1800s hodnota byla v oblasti rotoru. Teplota statorového vinutí nepřesáhla 95,5°C.



Nejlepší odvod tepla byl zaznamenán u kostry 3 ať už v provedení z hliníku, či šedé litiny. Hodnota maximální teploty byla u kostry z hliníku 92,9°C u kostry z šedé litiny 91,59°C obě tyto hodnoty byli v čase $t=1800s$. Z oteplovací charakteristiky srovnání materiálů kostry 3 také můžeme sledovat pozvolnější zahřívání kostry z litiny a také její pomalejší ochlazování. Tato vlastnost je dána jinými teplotními parametry litiny zejména nižší měrnou vodivostí, tepelnou kapacitou a na druhou stranu více než dvojnásobnou hustotou materiálu oproti hliníku.

Důležitým hlediskem pro vyhodnocení simulace provozu zařízení je provozní teplota.

V žádném ze simulovaných průběhů nedošlo k překročení maximální teploty 105°C. Z této hodnoty můžeme určit druh izolace potřebné pro vinutí motoru. Při výběru třídy izolace si však musíme uvědomit, že interval zkoušky (simulace počítá pouze s dobou provozu 1800s). V této hodnotě nedochází k ustálení maximální teploty motoru.

Klasifikace izolačních materiálů podle ČSN EN 60085 je provedena rozdělením do teplotních tříd. Teplotní třída izolačního systému je výslednice a průnik tříd jednotlivých komponent systému. Vzhledem k nejrozšířenějšímu používání izolací vinutí pomocí epoxidových laků a pryskyřic musíme zohlednit maximální teplotu vinutí kladenou požadavky izolační třídy (155)F.

V případě potřeby delších průběhů je nutné doplnit stroj ventilací, nebo jiným druhem chlazení. Ideální pro tento druh chlazení by byla kostra 3, u níž by stačilo doplnění ventilátoru na osu rotoru. Touto situací je možné se dále zabývat. Jedno z mnoha řešení této situace by bylo řešení pomocí simulace proudění v Ansys Workbench.



3 LITERATURA

STÁREK Miroslav, Metoda konečných prvků v AIP, Inventor News roč. 2004 č.3, s. 8-12

ONDRUŠEK Čestmír, Elektrické stroje, ES VUT

AUBRECHT, Vladimír, Informatika v silnoproudé elektrotechnice, ES VUT

BAXANT Petr, Elektrické teplo a světlo. 1 vyd. Brno: VUT v Brně,

2004. s. 1 - 190 . ISBN 80-214-2761-2

JIRÁK Josef, HAVLÍČEK Svatopluk, ROZSÍVALOVÁ Zdenka, Diagnostika
a zkušebnictví, s. 42 ES VUT

Internetová literatura:

Wikipedia EN [online], Finite element method, dostupné na

WWW:<http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method>

Wikipedia CZ [online], Asynchronní motor a jeho materiály, dostupné na

WWW:<http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavn%C3%AD_2>

Engineering ToolBox [online], Vlastnosti látek, dostupné na

WWW: <<http://www.engineeringtoolbox.com>>

Ansys Homepage [online], Představení produktu Ansys Workbench, dostupné na

WWW:<<http://www.ansys.com/industries/default.asp>>



4 PŘÍLOHY

Tabulka vypočtených hodnot jednotlivých simulací:

kostra 1		kostra2		kostra 3		kostra3 litina	
t[s]	Tmax[°C]	t[s]	Tmax[°C]	t[s]	Tmax[°C]	T[s]	Tmax[°C]
1	22,795	1	22,835	1	22,763	1	22,763
2	23,309	2	23,417	2	23,261	2	23,261
5	24,186	5	24,509	5	24,183	5	24,183
14	25,464	14	26,378	14	25,764	14	25,756
41	27,295	41	29,493	41	28,291	41	28,645
122	31,398	122	35,666	122	33,432	122	34,443
313,91	41,811	365	50,132	243,13	40,226	215,26	39,864
666,26	57,907	674,98	65,419	584,03	55,939	495,03	52,723
1026,3	71,965	1035	79,945	980,06	70,614	891,74	67,363
1386,3	84,014	1395	91,846	1474	84,929	1375,5	81,446
1593,1	90,327	1597,5	97,786	1800	92,954	1800	91,692
1800	96,105	1800	103,11	1801	92,852	1801	91,588
1801	95,957	1801	102,37	1802	92,766	1802	91,503
1802	95,863	1802	102,28	1805	92,465	1805	91,204
1805	95,562	1805	101,98	1813,9	91,706	1813,2	90,505
1812,6	94,892	1813,3	101,27	1837	90,27	1834,1	89,178
1830,6	93,725	1835,5	99,85	1906,1	87,14	1891,5	86,637
1882	91,459	1902,1	96,587	2113,5	79,638	2063,7	80,899
2036	86,525	2083,4	89,1	2473,5	69,15	2423,7	71,335
2361,2	78,054	2443,4	77,024	2833,5	60,584	2783,7	63,375
2721,2	70,089	2803,4	67,13	3193,5	53,572	3143,7	56,705
3081,2	63,259	3163,4	59,017	3396,7	50,06	3371,9	52,94
3441,2	57,404	3381,7	54,673	3600	46,936	3600	49,582
3600	54,996	3600	50,838				